

Pekka Salomäki

**Lietetuhkalannoituksen vaikutus puiden ja metsämaan
ravinteisiin sekä puuston kasvuun**

Seurantatutkimus

Opinnäytetyö

Syksy 2014

SeAMK Elintarvike ja maatalous

Metsätalouden koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Elintarvike ja maatalous

Koulutusohjelma: Metsätalouden koulutusohjelma

Suuntautumisvaihtoehto:

Tekijä: Pekka Salomäki

Työn nimi: Lietetuhkalannoituksen vaikutus puiden ja metsämaan ravinteisiin sekä puuston kasvuun

Ohjaaja: Risto Lauhanen

Vuosi: 2014

Sivumäärä: 89

Liitteiden lukumäärä: 8

Lietetuhkan käytöstä metsänlannoitteena on tehty vain vähän pidempiaikaisia tutkimuksia. Tämä opinnäytetyö on seurantatutkimus, jossa seurattiin lietetuhkan toimivuutta metsänlannoitteena vuonna 2001 perustetuilla lannoitekoealoilla. Edellinen seurantatutkimus julkaistiin vuonna 2007.

Lietetuhkan ja typellä vahvistetun lietetuhkan vaikutuksia puuston kasvuun ja metsän ravinnetilaan verrattiin väkilannoitteilla lannoitettuihin ja lannoittamattomiin koealoihin. Ähtärissä tehdyssä tutkimuksessa olivat mukana puolukkaturvekankaan ja mustikkatyyppin männiköt sekä lehtomaisen kankaan kuusikko. Puusto oli kaikilla kohteilla varttunutta kasvatusmetsää.

Tutkimuksessa havaittiin, että kumpikin tutkittu lietetuhkalannoite antoi PK-lannoitusta paremman kasvun turvemaan männikössä 11 vuoden tutkimusjaksolla. Kivennäismaan männikössä lietetuhkalannoitteiden antama lisäkasvu oli väkilannoitetta suurempi 2006–2011. Koko tutkimusajanjaksona suomensalpietarilla lannoitetut koealat olivat vuosikasvultaan vielä hiukan lietetuhkalannoitettuja aloja edellä. Kivennäismaan kuusikossa väkilannoitteen antama kasvu hiipui ja typellä vahvistettu lietetuhka antoi 2001–2012 vuosina parhaan vuotuisen kasvun (10,3 m³/ha).

Turvemaan männikössä seurattiin neulasten ravinnetasoa. Kalsiumin määrä kasvoi edellisestä tutkimuksesta kaikilla koealoilla. Myös typen määrä nousi hiukan kaikilla tutkimusaloilla. Kaliumin määrä pysytteli edellisen tutkimuksen tasolla. Pin-taturpeen ja humuksen sisältämät kalsiumin ja boorin määrät laskivat selvästi edellisestä tutkimuksesta. Erilasten lannoitteiden ei katsottu antaneen suurta muutosta puuston ilmiasuun.

Lietetuhkalannoitteita voitiin tutkimuksen perusteella pitää hyvinä vaihtoehtoina myös kivennäismaiden lannoitteiksi.

Avainsanat: liete, lannoitus, metsä, tuhka, ravinne, kasvu, puusto

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: Food and Agriculture Unit

Degree programme: Forestry

Specialisation:

Author/s: Pekka Salomäki

Title of thesis: Effect of the sludge ash fertilization on the growth of the tree and nutritional status of a forest

Supervisor(s): Risto Lauhanen

Year: 2014

Number of pages: 89

Number of appendices: 8

There are only a few long-term studies on using sludge ash as a forest fertilizer. This thesis is a follow-up study observing the functionality of sludge ash as a forest fertilizer in fertilizer sample plots established in 2001. The first observational study was published in 2007.

The effects of sludge ash or sludge ash fortified with nitrogen on the growth of a tree stand and the nutritional status of a forest was compared with sample plots that were either fertilized with strong fertilizers or left unfertilized. The study was conducted in the municipality of Ähtäri and included Scots pine stands growing either on drained *Vaccinium vitis-idaea* type peatland or on a *Myrtillus* site type and additionally a Norway spruce stand growing on grove like heath. In all the plots, the tree stand was mature growth forest.

The study showed that both of the tested sludge ash fertilizers produced better growth than PK-fertilization in the Scots pine stand growing on the drained peatland during the 11-year study period. In the Scots pine stand growing on mineral soil, the sludge ash produced greater extra growth than the strong fertilizer during 2006–2011. During the whole study period, the annual growth was still a little better on the sample plots fertilized with Finnish saltpetre than on the sample plots fertilized with sludge ash. In the Norway spruce stand growing on mineral soil, the growth promoted by the strong fertilizer slowed down and the sludge ash fortified with nitrogen produced the best annual growth (10,3 m³/ha) during 2001–2012.

In the Scots pine stand growing on peatland the nutrient level of the leaves was observed. The amount of calcium increased in all the plots from the previous study. Also the amount of nitrogen increased a little bit in all the observed plots. The amount of potassium remained at the same level as in the previous study. The amounts of calcium and boron in the surface peat layer and humus decreased clearly from the previous study. The various fertilizers seemed not to produce a significant change in the outlook of the tree stands.

Based on this study, the sludge ash fertilizers can be regarded as good alternatives to be used also as fertilizers for mineral soils.

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
1 JOHDANTO	8
2 TUTKIMUKSEN TAUSTA JA TAVOITTEET	10
2.1 Tutkimusaiheen tausta	10
2.2 Tutkimuksen tavoite	11
3 PUUSTON RAVINTEET JA METSÄNLANNOITUS	13
3.1 Ravinteiden tehtävät puissa ja tyypilliset puutosoireet	13
3.2 Metsänlannoitus Suomessa	16
3.2.1 Lannoitus turvemailla	21
3.2.2 Lannoitus kivennäismailla	23
3.3. Tutkimustietoa biolietteiden lannoitekäytöstä	25
4 AINEISTO JA MENETELMÄT	28
4.1 Vertailtavat lannoitteet	28
4.2 Koealat	29
4.3 Puuston mittaukset	32
4.4 Mitattujen puustotunnusten tilastollinen käsittely	33
4.5 Neulasnäytteiden näytteenotto ja analysointi	35
4.6 Maanäytteiden näytteenotto ja analysointi	36
4.7 Harvennus	36
5 TULOKSET	42
5.1 Lannoituksen vaikutus puuston ilmiasuun	42
5.2 Lannoituksen vaikutus keskilämpimän kasvuun	43
5.3 Lannoituksen vaikutus pohjapinta-alaan	46
5.4 Lannoituksen vaikutus puuston tilavuuskasvuun	49
5.4.1 Männyn tilavuuskasvu turvemailla	50
5.4.2 Männyn tilavuuskasvu kivennäismailla	51
5.4.3 Kuusen tilavuuskasvu kivennäismailla	53
5.5 Lannoituksen vaikutus neulasten ravinteisiin	55
5.5.1 Typpi ja fosfori	56
5.5.2 Kalium ja kalsium	57

5.5.3 Magnesium ja boori	58
5.5.4 Typen suhde kaliumiin ja fosforiin	59
5.6 Lannoituksen vaikutus maaperään	60
5.6.1 Maaperän happamuus turvemaalla.....	60
5.6.2 Maaperän ravinteet turvemaalla	61
5.6.3 Maaperän ravinteet kivennäismaan männikössä	62
5.6.4 Maaperän ravinteet kivennäismaan kuusikossa	63
6 TULOSTEN TARKASTELU	66
6.1 Lannoituksen vaikutus happamuuteen ja ravinteisiin	66
6.2 Lannoituksen vaikutus puuston kasvuun.....	67
6.3 Lopuksi	68
LÄHTEET	70

Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Lannoitteiden sisältämät ravinteet (kg/ha)	29
Kuvio 2. Lietetuhkalannoituskokeiden sijaintikartta	30
Kuvio 3. Harvennuksen muutos metsikön pohjapinta-alaan ja pituuteen.....	39
Kuvio 4. Puuston keskimääräinen rinnankorkeusläpimitan kasvu turvekankaan männikössä 2001–2012.	44
Kuvio 5. Puuston keskimääräinen rinnankorkeusläpimitan kasvu kivennäismaan männikössä 2001–2012.	45
Kuvio 6. Puuston keskimääräinen rinnankorkeusläpimitan kasvu kivennäismaan kuusikossa 2001–2012.....	46
Kuvio 7. Keskimääräinen ppa:n (m^2/ha) kasvu vuodessa turvekankaan männikössä 2001–2012.	47
Kuvio 8. Keskimääräinen ppa:n (m^2/ha) kasvu vuodessa kivennäismaan männikössä 2001–2012.	48
Kuvio 9. Keskimääräinen ppa:n (m^2/ha) kasvu vuodessa kivennäismaan kuusikossa 2001–2012.....	49
Kuvio 10. Puuston keskimääräinen kasvu (m^3) vuodessa turvekankaan männikössä 2001–2006 ja 2006–2012.....	50
Kuvio 11. Puuston keskimääräinen kasvu (m^3) vuodessa turvekankaan männikössä 2001–2012.	51
Kuvio 12. Puuston keskimääräinen kasvu (m^3) vuodessa kivennäismaan männikössä 2001–2006 ja 2006–2012.....	52
Kuvio 13. Puuston keskimääräinen kasvu (m^3) vuodessa kivennäismaan männikössä 2001–2012.	53
Kuvio 14. Puuston keskimääräinen kasvu (m^3) vuodessa kivennäismaan kuusikossa 2001–2006 ja 2006–2012.	54
Kuvio 15. Puuston keskimääräinen kasvu (m^3) vuodessa kivennäismaan kuusikossa 2001–2012.....	55
Kuvio 16. Typen ja fosforin määrät turvemaan männikön neulasissa.	57
Kuvio 17. Kaliumin ja kalsiumin määrät turvemaan männikön neulasissa.	58
Kuvio 18. Lietetuhkalla+typellä lannoitetun turvemaan männikön ravinteet (0–10 cm ja 10–20 cm syvyyksillä).....	61
Kuvio 19. Lietetuhkalla+typellä lannoitetun kivennäismaan männikön ravinteet (0–10 cm ja 10–30 cm syvyyksillä).....	63
Kuvio 20. Lietetuhkalla+typellä lannoitetun kivennäismaan kuusikon ravinteet (humuskerros).....	64
Kuvio 21. Lietetuhkalla+typellä lannoitetun kivennäismaan kuusikon ravinteet (0–10 cm ja 10–30 cm syvyyksillä).....	65

Taulukko 1. Puiden ravinteiden tehtäviä ja puutosoireita	16
Taulukko 2. Kivennäismaan männikön puustotunnukset ennen ja jälkeen harvennuksen.....	41
Taulukko 3. Harvennuspoistuma kuvioittain kivennäismaan männikössä	41
Taulukko 4. Typen suhde kaliumiin ja fosforiin turvemaan männikön neulasissa ..	59

1 JOHDANTO

Metsien lannoitus on taas yleistymässä Suomessa. Lannoitusta alettiin käyttää suuremmassa mittakaavassa Suomen metsissä 1960-luvulla. Lannoituksiin kannustettiin metsänomistajia mm. erilaisin metsänrahoitusohjelmin. Metsänlannoitusten suosio on vaihdellut. Viidentoista vuoden hiljaisemman ajanjakson jälkeen lannoitusalat ovat olleet kasvussa vuodesta 2005 lähtien (Metsätilastollinen vuosikirja 2013, 110). Lannoituksen tarve ei ole vuosien mittaan niinkään vaihdellut, vaan tukipolitiikan lisäksi nähtävästi taloudellinen tilanne on ajoittain hillinnyt metsänomistajien intoa lannoitusta kohtaan. Ympäristötietoisuuden lisääntymisen lisäksi on 2010-luvulla maailmanlaajuinen talouskriisi ohjannut metsänomistajia tutkimaan paremmin, miten metsistä voisi saada irti enemmän tuottoa. Toisaalta metsätilojen pirstoutuminen on nykyään yhtenä tekijänä heikentämässä lannoituksen kannattavuutta.

Suomessa on runsaasti turvepohjaisia metsiä, joissa on puutetta kaliumista, fosforista ja hivenravinteista. Vuosikymmeniä on tiedetty, että nimenomaan turvemailla voidaan tuhkalannoituksella melko pienin panoksin saada aikaan pitkäkestoinen puuston kasvun parantuminen. Kivennäismaiden metsissä on suurin puute käyttökelpoisesta tyypestä.

Metsäteollisuuden prosesseissa taas syntyy runsaasti biolietteitä. Niistä osa on voitu käyttää esim. energiantuotantoon, mutta suuri osa on mennyt kaatopaikkajätteeksi. Ympäristö- ja talousseikat ovat pakottaneet teollisuudenalan miettimään, miten näitä jätteitä voitaisiin paremmin hyödyntää. Yhdistämällä puun tuhka ja bioliete, voidaan saada lannoite jota voidaan käyttää puuston kasvun parantajana.

Opinnäytetyössäni tutkin puuston kasvun lisääntymistä lietetuhkalannoituksen avulla. Humuspehtoori Oy on pälkäneläinen yritys joka kehittää ja myy maanparannusaineita. Tämä tutkimus on aloitettu yrityksen tilauksesta vuonna 2001. Seurantamittaukset tehtiin vuonna 2007 ja nyt on uuden seurantatutkimuksen aika.

Tutkimus tuo yritykselle tietoutta sen valmistamien lannoitteiden vaikutuksista. Koska lietetuhkalannoitusta on tutkittu vasta vähän, tieto on arvokasta tuotekehittelyn kannalta. Tutkimustulokset voivat luoda yritykselle hyvän astinlaudan ponnis-

taa eteenpäin lannoitteiden kehittämisessä. Tällöin Humuspehtoori Oy pystyy tuottamaan ja myymään tutkitusti tehokkaita lannoitteita, jotka ovat myös ympäristön kannalta kestäviä.

Tutkimuksen päätavoitteena on seurata, millainen vaikutus lietetuhkalannoituksella on puuston kasvuun ja metsän ravinnetilaan. Tätä tutkitaan vertailemalla lannoituksen vaikutuksia lietetuhkalannoitetuissa ja väkilannoitetussa sekä lannoittamattomassa metsässä.

2 TUTKIMUKSEN TAUSTA JA TAVOITTEET

2.1 Tutkimusaiheen tausta

Nykyään metsistä otetaan usein hakkuun yhteydessä talteen myös hakkuutähteet ja kannot. Jo nuorista metsistä kerätään energiakäyttöön sellaista puuta, joka on aiemmin ollut tapana jättää metsään. Näiden metsäenergiamuotojen lisääntynyt käyttö vähentää ravinteiden määrää metsissä (Hakkila & Kalaja 1983, 5). Erityisesti nuorissa kasvatusmetsissä tapahtuva kokopuunkorjuu on haitallista ravinnetalouden kannalta. Suuri osa havupuiden ravinteista on niiden neulasissa. Kokopuunkorjuussa poistuu metsästä myös suuri osa poistettavien puiden neulasmassasta. Puun korjuun jälkeen metsään jäävä puusto on nopeasti kasvavassa iässä ja kaikki liikenevät ravinteet olisivat tarpeen (Kukkola ym. 2003, 91). Lannoituksella voidaan paikata tuota ravinnetalouteen syntyvää aukkoa ja jopa kohentaa ravinnetasapainoa alkuperäistä tilannetta paremmaksi. Tyypillisesti kivennäismaalla on puutetta liukoisesta tyyppistä, ja turvemailla taas metsät kärsivät erityisesti kaliumin, fosforin ja hivenravinteiden puutetta (Makkonen & Häggman 2008, 4–9).

Puun ja turpeen poltosta syntyy tuhka- ja jäte-ainetta. Tuhkaa tuottavissa laitoksissa sitä on perinteisesti läjitetty muun käyttötarpeen puuttuessa. Läjitysmaiden koot ovat kuitenkin rajalliset. Muita käyttökohteita ovat olleet muun muassa maisemointi, tie- ja kaatopaikkarakentaminen, käyttö asfaltin ja sementin lisäaineena, maanparannusaineena ja peltolannoitteena. Puun ja turpeen polttamisesta saatu tuhkamäärä kaksinkertaistui vuosina 1996–2006, ja on tämän jälkeenkin lisääntynyt huomattavasti (Soininen, Mäkelä, Kyyhkynen & Muukkonen 2010, 23–24). Polttamisen lisääntyminen antaa mahdollisuuden hyödyntää enenevissä määrin tuhkaa myös metsänlannoituksessa. Puun poltossa syntyvä tuhka sisältää tyyppistä lukuun ottamatta lähes optimaalisessa suhteessa puiden kasvuun tarvitsemia ravinteita (Kukkola & Saarsalmi 2009, 63). Tuhkan lannoitevaikutus kestää maaperässä useita kymmeniä vuosia (Huotari 2012, 22). Ellei tuhkalta löydetä jatkokäyttöä, aiheuttaa se tuottajalleen taloudellisia rasitteita niin jäte-, läjitys-, kuin kuljetuskulujenkin muodossa.

Metsäteollisuuden jäteliemien hyödyntäminen lannoitteena on kohtuullisen uusi ja vähän tutkittu asia. Vaikka metsäteollisuuden prosesseissa syntyvät jäteliemet voidaan osittain hyödyntää, muodostaa niiden jatkokäyttö suuren haasteen niin ekologisesti, kuin taloudellisestikin. Paperi- ja selluteollisuuden kiinteistä jätteistä muodostavat jäteliemet suurimman osan. Yhä kasvava huoli ympäristön tilan heikkenemisestä lisää metsäteollisuudellekin tarvetta päästä jätteistä kannattavasti eroon. Jäteverouudistuksen (Hallituksen esitys Eduskunnalle jäteverolaiksi 2010; Jäteverolaki 1126/2010) myötä kaatopaikkamaksut tulevat nousemaan ja erityisesti kierrätykseen ja energiantuotantoon kelpaavien jätėjakeiden kaatopaikkahinnat kallistuvat. Jäteliemiä voidaan käyttää typpilannoitteena ja tässä tapauksessa niitä on käytetty täydentämään tuhkalannoitetta. Lietetuhkalannoituksessa voidaan hyödyntää näitä jätteitä (Huotari 2012, 12). Tämä vähentää osaltaan jäteliemien aiheuttamaa ympäristökuormitusta. On hyödyllistä, että tuhkaa ja metsäteollisuuden jätteitä voidaan palauttaa takaisin metsään. Siinä toteutuu ekologisesti kestävä metsän käyttö. Jätteiden uudelleenkäyttöön osallistuvat tahot saavat toiminnastaan myös imagohyödyn, jolla voi olla arvaamattoman korkea arvo.

2.2 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on erityisesti selvittää, millaiset pitkäaikaiset vaikutukset lietetuhkalannoitteiden käytöllä on puuston kasvuun. Tutkimus myös lisää yleistä tietämystä lietetuhkalannoituksen käytöstä. Aiheesta on niukasti aiempaa pitkäkestoista tutkimusta, joten tuore tutkimustieto luo tärkeää lisäarvoa metsätalouden kannalta merkittävästä aiheesta. Lietetuhkalannoituksen käytön lisääminen edellyttääkin uuden tutkimustiedon tuottamista. Tutkimuksesta saatavan uuden tiedon avulla voidaan parhaimmillaan kohentaa suomalaisen metsätalouden kannattavuutta. Suomessa hyvin yleisten turvepohjaisisten metsien käyttämätön potentiaali voidaan hyödyntää tutkimuksen tuottaman tiedon avulla entistä paremmin. Metsänlannoitustutkimuksen avulla voidaan löytää keinoja, joilla ympäristön kuormitusta ratkaisevasti vähennetään metsäteollisuuden lietteitä ja tuhkaa hyödyntämällä. Metsää lannoittamalla voidaan aikaistaa hakkuumahdollisuuksia, lisätä arvopuun määrää sekä puukauppatuloja (Makkonen & Häggman 2008, 20).

Tekemäni työ on jatkoa vuonna 2001 aloitettuun tutkimukseen. Tällöin Ari Niemelä perusti opinnäytetyössään lannoituskokeiden tutkimuskoealat. Vuonna 2007 Esa Eloranta teki seurantatutkimuksen lannoitusten vaikutuksista. Tämän tutkimuksen tehtävänä on selvittää, millaisia muutoksia ravinnetaloudessa ja puiden kasvussa on pidemmällä, 11 vuoden ajanjaksolla, lannoituksen seurauksena.

Opinnäytetyössäni käydään läpi metsänlannoituksen vaikutuksia ja eri ravinteiden puutteiden puille aiheuttamia oireita. Työssä tutkitaan erilaisten lannoitteiden aiheuttamia vaikutuksia puiden kasvuun ja maaperän sekä neulasten ravinnepitoisuuksiin. Erotuksena aiempiin tutkimuksiin tämän seurantatutkimuksen yhteydessä harvennettiin kivennäismaan männikön koealat. Seikka oli otettava huomioon mitauksissa ja se tuo oman vivahteensa tulevaisuudessakin tehtäviin seurantatutkimuksiin. Lisänä aiempaan seurantatutkimukseen työssä pyritään tekemään myös puuston ilmiä koskeva subjektiivinen tarkastelu. Sen tarkoituksena on verrata eri lannoitteiden vaikutusta puiden runkomuotoon, oksistoon ja neulasten ulkonäköön. Koska lannoituksista on yli 10 vuotta aikaa, niiden vaikutusten puiden elinvoimaan tulisi näkyä jo ulospäinkin. Kaikilla koealoilla kasvaa jo varttunutta kasvatusmetsikköä. Tunnusmerkkinä tästä on, että puiden rinnankorkeusläpimitat ylittävät kaikilla koealueilla 16 cm.

Työn toimeksiantajana on Humuspehtoori Oy. Yritys kehittää muun muassa metsänlannoitukseen käytettäviä lannoitteita. Näiden valmistuksessa yritys on yhdistänyt teollisuuden jäteliemiä puun ja turpeen polttamisesta saatuun tuhkaan. Yhdistämällä oikeassa suhteessa jäteliemi ja tuhka voidaan saada aikaan sopiva lannoite sellaiseenkin maahan, jossa on pulaa timestä (Huotari 2012, 12). Yritys tutkii mahdollisuuksia päästä metsien lannoittamisessakin väkilannoitteiden käytöstä enenevässä määrin luonnonmukaisempien lannoitteiden käyttöön. Tehtävän tutkimuksen tulokset auttavat Humuspehtoori Oy:tä parantamaan tuotteitaan yhä paremmiksi.

3 PUUSTON RAVINTEET JA METSÄNLANNOITUS

3.1 Ravinteiden tehtävät puissa ja tyypilliset puutosoireet

Puiden tarvitsemat ravinteet luokitellaan pää- ja hivenravinteisiin. Pääravinteita ovat typpi, fosfori, kalium, kalsium, magnesium, rikki ja natrium. Hivenravinteita puut tarvitsevat vain pieniä määriä. Siitä huolimatta nekin ovat tärkeitä. Kaikilla niillä on oma tärkeä tehtävänsä. Hivenravinteet säätelevät puiden elintoimintoja ja ovat osallisina mm. aineenvaihdunnassa. Hivenravinteiden saatavuuteen vaikuttavat mm. maan ominaisuudet, esimerkkinä happamuus ja fysikaaliset ominaisuudet. (Metsän kasvuohjelma, 18.)

Puiden on saatava ravinteita sopivissa määrin ja oikeina pitoisuuksina. Jos puute, niin liikakin määrä tiettyä ravinnetta on pahasta. Puille on saatavilla ravinteita niin maasta kuin ilmastakin. Tärkeä ravinnevarasto metsissä on myös aluskasvillisuus. Esimerkiksi kalium pidättyy turpeeseen heikosti mutta sitä liikkuu runsaasti maassa kasvavien varpujen biologisessa kierrossa. Näin pienilläkin kasveilla on oma tärkeä tehtävänsä metsien ravinteiden kiertokulussa. (Hyvän metsänhoidon suositukset turvemaille 2007, 11). Asian tärkeyttä korostaa se, että varsinkin turvemilla mäntyjen juuret ovat hyvin pinnalliset. Näin ne pystyvät ainakin teoreettisesti hyödyntämään hyvin turpeen pintakerroksen ravinteita. Typpeäkin on runsaasti maaperässä, mutta Suomen ilmastolliset tekijät vaikuttavat siihen, että sitä vapautuu hyvin hitaasti puiden käyttöön sopivaan muotoon.

Ravinteiden määrät metsämaassa vaihtelevat sekä maantieteellisesti että pienpiirteisesti kuvioittainkin. Esimerkiksi turpeen paksuudella on merkitys siihen, ylettyykö juuristo hankkimaan kaliumia kivennäismaasta, vai jääkö kaliumin saanti turvemaalla sen varaan, mitä on pintaturpeessa. Ennen metsänlannoitukseen ryhtymistä onkin tärkeää selvittää metsikön alkuperäinen ravinnetilanne. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että ravinteiden määrät vähenevät siirryttäessä rehevältä metsätyypiltä karumpaan suuntaan. Boorin suhteen tilanne on toinen. Sen pitoisuus saattaa kasvaa siirryttäessä karumpiin paikkoihin (Laiho, Sarkkola, Kaunisto, Laine & Minkkinen 2008, 315–316.)

Rakenneraaka-aineiden (hiili, happi ja vety) lisäksi puut tarvitsevat ainakin 16 eri ravinnetta riittävästi ja oikeassa suhteessa (Metsän kasvuohjelma, 17). Minimitekijän lain mukaan puun yhteyttämisen ja kasvun voimakkuuden määrää se ravinnetekijä, jota on kasvien tarpeeseen nähden saatavissa vähiten. Jos puulla on esimerkiksi puutetta kahdesta ravinteesta, vain sen puute havaitaan, josta on kovempi tarve (Helmisaari 1990, 169). Esimerkiksi ojitettujen turvemaiden metsissä käytettävissä olevan fosforin määrä on yleinen kasvun minimitekijä (Reinikainen, Veijalainen & Nousiainen 1998, 18). Fosforinkin kohdalla on huomioitava, että suuri osa siitä on sitoutuneena ja vain vähän puiden käytettävissä.

Tärkeä kysymys ravinnetaloudessa on myös eri ravinteiden määrien suhde toisiinsa. Turvemaileda typpeä ja fosforia on runsaasti, mutta se on sitoutuneena pintaturpeeseen. Vasta riittävä määrä kalsiumia ja magnesiumia tehostavat turpeen ja humuksen orgaanisen aineen hajoamista ja ravinteet saadaan käyttöön (Kukkola 2003, 87). Näitäkin ravinteita on lietetuhkalannoitteissa huomattavasti käytettyjä väkilannoitteita enemmän. Toinen havaittava seikka varsinkin turvemetsissä on hiilen ja typen suhde. Suhteen ollessa suuri, ravinteet ovat tiukasti sitoutuneina biomassaan. (Päivänen 2007, 82.) Tällöin typpeä ei helposti vapaudu maasta kasvien käyttöön. Hiilen ja typen välinen suhde on erityisen tärkeä hajottajille (Siitonen 2008, 34). Typen ja fosforin suhde on puiden kasvun kannalta epäedullisin viljailulla kasvupaikoilla (Kukkola, 2003, 87).

Tarkasteltaessa tutkimuksessa käytettyjen lannoitteiden ravinnesisältöjä nähdään että kivennäismaiden metsissä fosforin ja typen suhde on paras lietetuhkalannoitteella. Siinä suhde on noin 3,3, kun taas lietetuhkassa+typessä suhde on 0,54. Väkilannoitteissa fosforia on vielä paljon vähemmän suhteessa typpeen. Monet tuhkan sisältämistä ravinteista ovat ainakin osittain hidasliukoisessa muodossa. Siksi sen antama lannoitusvaste ei ole aivan yhtä nopea kuin väkilannoitteilla (Silfverberg & Mertaniemi 1997, 27–34). Esimerkiksi fosfori on tuhkassa vaikeammin liukenevassa muodossa. Tuhkan sisältämät rauta ja alumiini sitovat fosforia. Boori, kalium, natrium ja rikki sen sijaan ovat nopealiukoisia (Matilainen ym. 2013, 33).

Kasvualustan ravinteisuutta ja puiden ravinnetilaa voidaan arvioida silmämääräisesti tai ravinnepitoisuuksia laboratoriossa määrittäen. Erityisesti terveyslannoituksissa on tarpeen tunnistaa puiden ulkonäöstä erilaisten ravinteiden puutosoireita.

Muutokset esimerkiksi neulasten väreissä johtuvat siitä, että puu siirtää niistä ravinteita käytettäväksi muihin tärkeisiin toimintoihin sisäisessä ravinnekierrossa. Neulasten kellastumista kutsutaan kloroosiksi ja ruskettumista nekroosiksi. Koska monet puutosoireet ovat yhteisiä monelle ravinteelle, niitä on tarkasteltava oireyhdistyminä tai analysoitava neulasnäytteet laboratoriossa. Taulukkoon 1 on koottu tietopakettina eri ravinteiden tehtäviä ja ravinteiden puutostilasta aiheutuvia päälepäin havaittavia puutosoireita.

Taulukko 1. Puiden ravinteiden tehtäviä ja puutosoireita (Reinikainen, Veijalainen & Nousiainen 1998, 19–31).

	Tehtävä	Puutosoire
Typpi	Valkuaisaineen ja kasvisolujen rakennusaine, vaikuttaa koko kasvutapahtumaan.	Hidas kasvu, lyhyet ja kellertävät neulaset. Latvuksen neulaset kellertävät koko pituudeltaan.
Fosfori	Aineenvaihdunta ja energiatalous. Siementen itäminen ja juuriston normaali kehitys. Valkuaisaineen rakenneosaa.	Neulasten kärkien ruskettuminen ja neulasten ennen aikaista kuoleminen ja variseminen. Neulaset jäävät lyhyiksi ja ruskean ja vihreän välinen raja on jyrkkä. Heikko puun kasvu, mutkainen ja hento vuosikasvain.
Kalium	Tärkein tehtävä entsyymien aktiivointi. Vesitaloutta ja aineiden kuljetusta säätelevä tekijä. Parantaa puiden kuivuuden ja pakkasen kestävyyttä ja edesauttaa puiden asettumista talvilepoon. Lisää vastustuskykyä kuivuus-, sieni- ja hyönteistuhon vastaan.	Neulasten kärjet kellastuvat ja ruskistuvat. Raja keltaisen ja vihreän välillä on liukuva, kloroosin alkaessa neulasen kärjestä. Kuusen kaliumin puutoksessa viimeinen neulasvuosikerta on vihreä, mutta vanhemmat eriasteisen kellertäviä.
Kalsium	Edistää juurten kasvua ja siementen itämistä. Nostaa maan pH:ta hitaasti ja pitkäaikaisesti.	Puiden yleinen heikkous ja neulaskato. Neulaset kalpean kellertäviä. Monilataisuus.
Magnesium	Yhteyttämisen edellytys. Lehtivihreän rakennusaine.	Oksien kärkikato. Heikentynyt pituuskasvu. Neulaset keltäkärkisiä. Edellisen kesän neulasissa väri raja keltaisen ja vihreän välillä on selvä.
Boori	Entsyymien ainesosa. Pölytystapahtuman säätelijä. Edistää fosforinottoa maasta. Puute aiheuttaa juuristovaurioita, jotka vaikeuttavat ravinteiden saantia.	Silmut kehittyvät heikosti tai kuolevat kokonaan. Herkimpiä latvasilmut. Yrittää korvata kuolleen latvan kasvattamalla sivuoksia latvaksi.
Kupari	Vastaa solujen hapetuksesta, vaikuttaa pölytyksen onnistumiseen	Vuosikasvaimet mutkikkaita ja alaspäin taipuneita. Neulaset ovat punaruskeita tai sinertäviä, kärjistään keltaisia tai jopa kuolleita.
Sinkki	Pituuskasvu.	Pystyt, ohuet oksat. Neulaset lyhyitä. Neulastihentymiä.

3.2 Metsänlannoitus Suomessa

Metsänkasvatus ja metsäteollisuus ovat keskeisiä taloudellisen hyvinvoinnin lähteitä Suomessa. Metsänkasvatuksen kannattavuus on kuitenkin heikentymässä. Tämän vuoksi tarvitaan keinoja, joilla sitä voidaan parantaa. Lannoituksella voidaan huomattavasti parantaa metsän kasvua. Lannoitusten päämääriä on kaksi:

joko ne ovat metsän terveyttä parantavia terveyslannoituksia, joiden tavoitteena on korjata ravinnetasapainon häiriöitä ja kasvutappioita tai sitten pyritään kasvatuslannoituksin puuston maksimaaliseen tuottoon.

Metsänlannoitus on ollut Suomessa mittavampaa kuin missään muualla maailmassa (Salonen 1999, 101). 1970- ja 1980-luvuilla metsänlannoitusalat Suomessa olivat suurimmillaan (Metsätilastollinen vuosikirja 2013, 110). Siihen aikaan metsien käyttö oli puuston kasvua suurempaa. Oli olemassa huoli puuvarojen riittävyydestä. Lannoittamalla pystyttiin sekä lisäämään metsämaan pinta-alaa että parantamaan kasvua. Metsien kasvun noustua poistumaa suuremmaksi vähenivät tarpeet uudisojituksen ja lannoituksen käyttämiseen. Myös valtio vähensi tukeaan näille toimille (Lannoitevalmistesektorin tulevaisuuskatsaus vuosille 2009–2013 2008, 7).

Mahdollisesti 2008 alkanut maailmanlaajuinen talouskriisi on ohjannut metsänomistajia tutkimaan paremmin, miten metsistä voisi saada irti enemmän tuottoa. Puunmyyntituloilla on tärkeä merkitys rahoituslähteenä myös monille suurilla investointeja tekeville maatiloille. Metsänlannoitusta voi pitää normaalina tuotannon investointina. Tuottoja saadaan parantuvina hakkuutuloina asetettua panosta vastaan (Kuuluvainen & Valsta 2009, 128–136).

Metsänlannoituksen kulut saa vähennettyä verotuksessa ja lannoittaminen voi nostaa pääoman tuottoa parhaimmillaan runsaasti. Monet pitävät metsänlannoitusta tuottavimpana metsätalouden investointina. Joissain tapauksissa sillä voidaan saada 10–20 % korko sijoitetulle pääomalle.

Lannoituksella on vaikutuksensa jopa metsien ojitustarpeeseen sitä vähentäen (Puukila 2013, 44). Nopeammin kasvava puusto haihduttaa ja sitoo vettä normaalia enemmän. Myös sadanta maahan asti vähenee, koska latvusto on lannoittamisen seurauksena peittävämpi (Päivänen 2007, 120). Metsänlannoituksella voidaan myös kompensoida sen menetetyn puuston tuottoa, joka jää ojitettujen turvemaiden metsissä ojien ja ojalinjojen vuoksi pois tehokkaasta metsätalouskäytöstä (Hänninen 1998, 87).

Latvuston kehittymisellä suuremmaksi on muitakin seurauksia. Tuuheutunut latvus lisää varjostusta ja nopeuttaa alaoksien karsiutumista. Varsinkin männiköissä ok-

sattoman pintapuun osuus lisääntyy. (Metsän kasvuohjelma, 44). Pituuskasvun parantaminen lisää luonnollisesti erityisesti nuorissa metsissä oksattoman puun määrää. Pituuskasvun parantuessa vuosittaisten oksankiehkuroiden välimatkat toisistaan kasvavat (Kärkkäinen 2007, 75). Myös pystykarsitussa metsässä oksien arpien kyljestyminen nopeutuu huomattavasti lannoituksen ansiosta. Kuivaoksaisten ja huonosti hyödynnettävissä olevan kolmannen luokan tukin osuus tukisaannosta vähenee. Kuten harvennus, myös lannoitus muuttaa puiden runkomuotoa. Lannoituksen seurauksena kasvu kohdistuu enemmän puiden yläosiin kuin lannoittamattomissa metsissä. (Päivinen 1999, 45).

Jos lannoitus kasvattaakin puun rungon läpimittaa, sama tapahtuu myös oksille. (Kärkkäinen 2007, 270). Siksi on oma merkityksensä sillä, minkä ikäistä puustoa käydään lannoittamaan. Tässä tutkimuksessa kaikkien koealojen puusto oli jo varttunutta. Siksi lannoitus ei oksien läpimitan suurenemisen osalta heikennä puiden laatua merkittävästi. Säännöllisesti harvennetuissa metsissä paksuimmat oksat sijaitsevat sekä männyissä että kuusissa puiden latvuksissa. Siksi ne jäävät usein käyttöpuun, eli tukki- ja ainespuun ulkopuolelle.

Ilmastonmuutoksen myötä erilaisten sieni- ja hyönteistuhojen määrä tulee lisääntymään lähitulevaisuudessa. Hyväkuntoinen puusto on kestävä sairauksia ja monia metsätuholaisia vastaan. Oikeastaan lannoituksen vaikutus on kahtalainen. Toisaalta puiden kasvu ja terveydentila paranevat, mutta varsinkin typpilannoitus altistaa metsää hirven ja jäniksen tuhoille ja joillekin sienitaudeille. Kun typen määrä versoissa ja neulasissa kasvaa suhteessa hiilen määrään, valkuaisainepitoisuus muuttuu. Tämä houkuttelee tuholaisia puiden kimppuun. (Hynynen, Valkonen & Rantala 2005, 82).

Ilmastonmuutoksella on muitakin mahdollisia vaikutuksia metsänlannoituksiin liittyen. Kasvukauden piteneminen ja kesien lämpeneminen saattaa sinällään parantaa puuston kokonaiskasvua Suomessa. Ilmaston lämpeneminen voi lisätä typen mineralisaatiota ja näin puille käyttökelpoisen typen määrää metsissä. Tästä voi olla hyötyä mutta myös haittaa, jos ravinnetila ei pysy tasapainossa. Ilmastonmuutos voi myös lisätä myrskyjen ja metsätuhojen määrää. Näiden tuhojen kompensointi saattaisi vaatia lannoituksen lisäämistä. Asia on niin monisyinen, että sen kokonaisvaikutuksia puuston kasvuun voi vielä vain arvailla.

Myrsky- ja lumituhojen riski voi kasvaa lannoitetussa metsässä. Puuaineessa vaa-lean kevätpuun osuus tummaan kesäpuuhun verrattuna lisääntyy. Puuaineen tiheys laskee hiukan (2–5 %) (Kärkkäinen 2007, 166–167). Kasvupaikalla on tiheyteen kuitenkin lannoitusta isompi merkitys. Karuilla mailla tiheänä kasvava puusto kasvaa hitaammin ja tulee puuaineeltaan tiheämmäksi kuin rehevimmillä alueilla.

Metsänlannoituksessa on aina kysymys myös taloudellisuudesta. Lannoitettavan pinta-alan olisi oltava riittävän suuri, jotta levityksen kustannus ei kasva liian suureksi. Suuret yhtenäiset alueet vähentävät merkittävästi levityskustannusten osuutta. Täytyy osata tehdä myös kompromissi panosten ja tuoton suhteesta. Tutkimustenkin mukaan lannoitteiden suurempi hehtaarikohtainen määrä lisää kasvua, kunnes maksimipotentiaali saavutetaan. Vaikka puuston kasvu parantuukin levitetävien lannoitteiden määrää lisätessä, enää pieni kasvun lisäys ei ole taloudellisesti kannattavaa (Lauhanen, Moilanen, Silfverberg, Takamaa & Issakainen 1997, 78). Kannattavuuden arviointiin vaikuttaa luonnollisesti myös laskelmissa käytetty korkokanta. Korrelaation levitettyjen lannoitteiden määrän ja puuston kasvun välillä tulee olla melko vahva. Kuten puunkasvatukseen yleensäkin, metsänlannoituksen tuottoon sisältyy monia riskejä. Miten voimakas kasvureaktio saadaan ja mitkä ovat puutavaran hinnat tulevaisuudessa? Tuhoaako esimerkiksi myrsky lannoitetun metsän ennen puunkorjuuta? Kasvureaktion suuruuteen vaikuttavat metsikön ominaisuudet, kuten ikä, puuston määrä, vesitalous ja kasvupaikkatyyppi. Metsässä on myös oltava riittävä määrä kasvukykyisiä puita, joilla on mahdollisuus hyödyntää lisääntyvät ravinteet (Kuuluvainen & Valsta 2009, 128–136).

Samaan asiaan liittyvät myös mm. logistiset ja ravinnevalumia koskevat ongelmat. Varsinkin pehmeille turvemaille voi olla hankalaa kuljettaa ja levittää suuria hehtaarikohtaisia lannoitemääriä. Metsätiestökin asettaa erityisesti kelirikkoaikana rajoitteita kantavuudelle. Ravinnepäästöt lisääntyvät luonnollisesti samalla kun levitettäviä lannoitemääriä suurennetaan.

Yksinkertaistettuna havupuuston lannoittamisella parannetaan puiden yhteyttämis-tehoa ja lisätään neulasten kokoa eli yhteyttävää lehtipinta-alaa. Neulasvuosikertojen määrä puissa lisääntyy. Vaikka yhteyttämisessä onkin suoranaisesti mukana vain osa ravinteista, muut ravinteet voivat vaikuttaa reaktioihin epäsuorasti (Helmi-saari 1990, 176). Helmisaaren mukaan ensimmäisenä kasvukautena lannoittami-

sen jälkeen typpi antaa yhteyttämiseen tehoa. Sen jälkeisten vuosien kasvunlisäys on seurausta latvuston kasvun antamasta suuremmasta yhteyttämispinta-alasta. Myöhempinä vuosina puista putoava karike sisältää entistä enemmän ravinteita, joten lannoitus vaikuttaa metsän ravinnekiertoon monella eri tavalla.

Yleisesti on arvioitu, että havupuustoista metsää lannoittamalla kasvatettavien puiden tiheys alenisi. Tämä taas vaikuttaisi negatiivisesti saantoon ja vaikkapa paperitehdas saisi vähemmän raaka-ainetta samasta tilavuudesta. Kärkkäisen (2007, 166–167) mukaan tiheyden aleneminen on kuitenkin hyvin pientä verrattuna parantuneesta tilavuuden kasvusta saatavaan hyötyyn. Harvennuksen vaikutusta kuvataan vastaavaksi. Lisäksi lannoittamalla aikaansaatu tiheyden aleneminen on yleensä melko lyhytaikainen tapahtuma.

Kun metsää on lannoitettu, voidaan hyöty realisoida kahdella tavalla. Joko sama hakkuumäärä voidaan hakata aiemmin, tai samalla puuston kiertoajalla saadaan suurempi hakkuumäärä (Kuuluvainen & Valsta, 2009, 128–136.)

Väkilannoitteiden valmistaminen ei ole ympäristöystävällistä. Ne kuluttavat luonnon resursseja, kuten kalkkikiveä. Lisäksi väkilannoitteiden valmistamiseen joudutaan käyttämään paljon energiaa. Siksi on tärkeää pystyä kehittämään uusia vaihtoehtoisia lannoitteita. Puuntuotannossa syntyviä jätteitä pystytään käyttämään hyödyksi metsänlannoitteena. Jätteiden hyödyntäminen on tullut ajankohtaiseksi varsinkin 2010-luvulla ympäristötietoisuuden lisääntyessä. Kansallinen metsäohjelma 2015 korostaa puuntuotannon kestävästä kehitystä. Sen mukaan metsien terveys- ja kasvatuslannoitukset ovat olennaisia puuntuotannon kehittämisen kannalta. Lannoitusmenetelmien kehittäminen turve- ja kivennäismailla sekä puutuhkan käytön lisääminen metsänlannoitteena ovat eräitä ohjelman esittämiä tavoitteita. (Kansallinen metsäohjelma 2015, 9–20.)

Tässä tutkimuksessa seurataan sekä puiden läpimitan että pituuden kasvua. Läpimitan kasvulla on puun tilavuuteen pituuskasvua suurempi merkitys. Puun tilavuuden laskukaavassa tilavuus on suhteessa läpimitan neliöön, mutta pituudessa vain ensimmäiseen potenssiin. (Kärkkäinen 2007, 74.) Näin ollen läpimitan kasvu kasvattaa puun tuottoa pituuskasvua enemmän.

3.2.1 Lannoitus turvemaidella

Aiempiä vuosikymmeniä on ojitettu runsaasti luonnontilaisia soita. Nyt näiden suometsien puustot alkavat olla varttuneita. Turvepohjaisten metsien määrä tuokin suuren haasteen metsänlannoitukselle. Suomen metsien puuston kokonaistilavuudesta noin 23 % on turvepohjaisissa metsissä. Tästä määrästä noin puolet on mäntyä ja loppuosa jakaantuu lähes yhtä suurin osin koivulle ja kuuselle. (Päivänen 2007, 218). Koska turvemaiden metsillä on suuri merkitys puun tuotannossa, niille on löydettävä hyvät lannoitteet. Tällä tavoin niistä saadaan mahdollisimman paljon puuta teollisuuden käyttöön. Turvemaiden päätehakkuut tulevat myös lisääntymään nopeasti (Saarinen 2005, 177). Hakkuun yhteydessä metsästä poistuvat ravinteet on osittain korvattava lannoittaen, jotta seuraava puusukupolvi voi kehittyä riittävässä ja tasapainoisessa ravinteisuudessa.

Tuhkalannoitteet ovat hyvä vaihtoehto turvemaiden lannoituksille. Puuta käytetään polttoaineena yhä enemmän. Vaikka palamistekniikoita kehitetään yhä paremmiksi, polttamisessa syntyy aina tuhkaa. Puun poltosta saatu tuhkalannoite sisältää typpeä lukuun ottamatta suunnilleen samassa suhteessa ravinteita ja hivenaineita, kuin kasvavat puut niitä tarvitsevat (Kukkola & Saarsalmi 2009, 63). Tuhka pystyy mobilisoimaan turpeen sisältämiä ravinteita tehokkaaseen käyttöön. Se tehostaa karikkeen ja selluloosan hajoamista ja kiihdyttää hiilen mineralisaatiota pitkällä aikavälillä (Saarsalmi, Smolander, Moilanen & Kukkola 2014, 87). Tuhka lisää mikrobien ja bakteerien määrää ja lisää maahengitystä metsämaassa. Jotta tuhkalannoitetta voi käyttää parhaimmalla mahdollisella tavalla, on hyvin tärkeätä tuntea kasvupaikan pintaturpeen typpipitoisuus. Tuhkalannoitteesta saa parhaan hyödyn runsastyypisillä turvemaidella, toki suotyyppi, alueen kuivatustilanne ja turvekerroksen paksuus huomioiden.

Turvemaiden lannoittamisen ongelma on se, että tuhkanlannoitteiden hehtaarikoh-
taisten levitysmäärien on oltava suuria riittävän ravinnevaikutuksen aikaansaami-
seksi. Jotta levityskalusto ei uppoaisi tai tekisi vaurioita maaperään, levitys on teh-
tävä talvella tai hyvin kuivana aikana. Ympärivuotinen levitystoiminta on haastavaa
(Hakkila & Kalaja 1983, 6.)

Suomessa on näkyvissä tällä hetkellä trendi, jossa turpeen käyttö polttoaineena ei ole enää lisääntymässä. Pikemminkin sen tuotantoa pyritään rajoittamaan. Tällä on oma merkityksensä tuhkalannoitteiden sisältöön. Puun poltosta saatavan tuhkan osuus lisääntynee. Lannoitteena puun tuhka onkin turpeen poltosta saatavaa tuhkaa monipuolisempi ja ympäristöystävällisempi materiaali.

Monissa turvepohjaisissa metsissä ojituksesta lähtönsä saanut sukkessio on saanut aikaan puuston voimakasta kasvua. Puiden kasvuolosuhteet ovat parantuneet ojituksen myötä. Viime vuosikymmeninä ojitettujen turvemaiden metsät tulevat hiljalleen päätehakkuuikään. Suoperäisten metsien maaperässä on usein riittävästi typpeä, mutta puutetta muista ravinteista; fosforista, kaliumista ja boorista. Ainoastaan karuimmilla turvekangastyypeillä saattaa olla todellista puutetta myös tpeestä. Pitkäaikaisissa lannoitekokeissa näilläkin kohteilla on huomattu tuhkasta olevan hyötyä, vaikka vielä ensimmäisten vuosien aikana parantunutta puun kasvua ei havaittaisikaan (Saarsalmi ym. 2014, 92). Fosforin ja kaliumin puutteet korostuvat paksuturpeisilla ja nevaisilla soilla (Moilanen, Kaunisto & Sarjala 2005, 82). Päätehakuiden lisääntyessä eteen tulee uusi tilanne, jossa turvemailta poistuu paljon ravinteita. Varsinkin kaliumia ja booria poistuu metsistä runsaasti ainespuun mukana (Kukkola ym. 2003, 87). Tällaista suurimittaista ravinteiden poistumista ei voida korvata muulla kuin lisälannoituksella.

Tuhkan lannoitevaikutus turvemaille voi kestää kymmeniä vuosia (Huikari & Silfverberg 1985, 23–25). Siksi metsänlannoituksen tutkimuskaan ei voi olla lyhytjänteistä työtä. Tutkimuksessani seuran, jatkuuko lietetuhkalla lannoitetuilla koealoilla lannoitteen vaikutus väkilannoitettuja vertailukoealueita pidempään ja millaisen kasvuvasteen mikin lannoite saa aikaan. Pitkän seurannan tuloksena voidaan lannoitusten vaikutukset varmentaa ja näin antaa uusia ajatuksia toimeksiantajana toimivan yrityksen tuotekehitykseen. Lietetuhkalannoituksen vaikutusta metsien kasvuun ei ole Suomessa juuri tutkittu.

Aiemmassa seurantatutkimuksessa Esa Eloranta (2008, 42) tuli siihen tulokseen, että tyypellä vahvistettu lietetuhkalannoitus antoi parhaan kasvun turvemaan männikölle. Pelkällä lietetuhkallakin saatiin viidessä vuodessa aikaan selvää kasvun paranemista verrattuna kontrollikoealojen puuston kasvuun. Hypoteesini on, että

edellisessä tutkimuksessa havaitut erot eri lannoitekoealojen välillä ovat vahvistuneet, kun lannoituksen alkamisesta on kulunut 11 vuotta.

3.2.2 Lannoitus kivennäismailla

Toisin kuin turvemailla, kangasmailla puusto kärsii monesti typen puutteesta (Huotari 2012, 25). Tällöinkin tuhkan levittäminen voi tuoda apua lisäten boorin ja fosforin määrää. Tuhkan on todettu ruotsalaisessa tutkimuksessa parantaneen mm. männyn kasvua kangasmailla, mikäli kasvupaikka on ollut viljava (Jacobson 2003, 442–448). Yhteenvetona muista tutkimuksista on käsitys, että tuhkan ei ole havaittu parantavan varttuneen puuston kasvua merkittävästi kivennäismailla lyhyellä aikavälillä (<13 vuotta), mutta nuorilla puustoilla positiivisia vaikutuksia on havaittu (Saarsalmi, Smolander, Moilanen & Kukkola 2014, 87). Niukkatyppisillä kangasmailla tuhkan vaikutus ei ole välttämättä puiden parantunut kasvu, vaan ennemminkin maaperän eliöstön toiminnan koheneminen. Metsäpuut elävät symbioosis- sa mykorritsasienten kanssa. Nämä sienet saavat isäntäkasviltaan sokeria ja vastineena auttavat puita ravinteiden- ja vedenotossa (Pietiläinen, Sarjala, Hartman, Karsisto & Kaunisto 2005, 69). Toisaalta sienirihmat monikertaistavat juuriston ravinteita vastaanottavan pinta-alan, mutta ne pystyvät myös entsyymiensä ja happojensa avulla lisäämään vaikealiukoisten ravinteiden, kuten fosforin hankintaa isäntäkasville (Pietiläinen ym. 2005, 70). Tuhkan käytöllä on kangasmailla kalkitusvaikutus eli se nostaa metsämaan pH:ta. Kohoava pH parantaa mykorritsojen ja maaperän bakteeriston toimintaa. Pidemmällä aikajänteellä maaperän eliöstön vireytynyt toiminta tuonee kasvuhyötyjä puillekin. Pitkäaikaisessa Saarsalmen ym. (2014, 89–90) tutkimuksessa on havaittu tuhkasta olleen apua myös karun männikön kasvun parantajana. Tällöin täytyy varautua 10–15 vuoden odottamiseen, jotta kasvu alkaa parantua.

Kivennäismaan metsien kantavuus mahdollistaisi tuhkalannoitteiden levityksen lähes mihin vuodenaikaan tahansa. Tämä parantaisi nykyistä tilannetta, jossa tuhkaperaisiä lannoitteita käytetään ainoastaan turvemailla ja levitystä tehdään maaperän kantaessa, eli lähinnä talvella turpeen ollessa jäätyneenä. Metsänparannustoimenpiteiden ei sovi vaurioittaa maastoa eikä puustoa.

Suomessa kasvukausi on lyhyt. Tästä johtuen puun kasvussa tarvitseman typen määrä on lyhyellä aikajaksolla suuri (Helmisaari 1990, 166). Usein viljavien kivennäismaiden metsistä otetaan päätehakkuun yhteydessä talteen myös kannot ja hakkuutähteet joita käytetään energian tuotantoon. Näin metsäenergian lisääntynyt käyttö vähentää ravinteiden määrää metsissä. Typen poistuma saattaa jopa kolminkertaistua korjattaessa hakkuutähteet metsästä ainespuun ohessa (Maa- ja metsätalousministeriön työryhmä 2008, 23). Samoin neulaset ja oksat sisältävät runsaasti fosforia. Puutavaran ja hakkuutähteiden korjuun mukana metsästä poistuu myös emäskationeita, mikä lisää metsämaiden happamuutta (Österbacka 2001, 6). Metallien liukoisuus ja niiden huuhtoutumisriski kasvaa, kun maa happamoituu (Helmisaari ym. 2008, 23).

Vaikka hakkuutähteitä ei kerättäisikään, metsän ravinnekierto voi häiriintyä puunkorjuun yhteydessä. Erityisesti korjuukoneella suoritetuissa harvennuksissa koneen karsimat oksat ja latvat jäävät kasoihin eri puolille metsää. Tämän seurauksena osalla puista on runsaasti ravinteita käytettävissään, kun taas osa ei saa ylimääräisiä ravinteita hakkuutähteistä. (Kukkola, ym. 2003, 90.)

Typpilannoituksen aiheuttama lisäkasvu kangasmailla on suurimmillaan noin viiden vuoden iässä (Makkonen & Häggman 2008, 18). Sen jälkeen lisäkasvu laskee voimakkaasti. Niin puusto kuin muut kasvit ja mikrobitkin käyttävät saatavan typen nopeasti, koska se on kasvua rajoittava ravinne kangasmailla. Typen vaikutuksen loputtua kasvu taantuu nopeasti normaaliksi tai jopa hiukan alle normaalin kasvun. Tämä saattaa johtua siitä, että saadessaan runsaasti ylimääräistä typpeä, puut keskittyvät kasvattamaan maan yläpuolisia osia juurien kustannuksella ja myöhemmin typen määrän vähentyessä puu kasvattaa enemmän juuria. (Saarsalmi ym. 2014, 91). On havaittu, että kaupallinen typpilannoite ei nostanut maan pH:ta kokeessa, jossa sitä levitettiin puolukkatyypin männikköön ja mustikkatyypin kuusikkoon (Saarsalmi, Smolander, Kukkola & Arola 2010, 333).

Ari Niemelän perustamassa tutkimuksessa ovat mukana sekä kivennäismaan männikkö että -kuusikko. Edellisessä seurantatutkimuksessa kivennäismaan männikölle parhaan kasvun antoi väkilannoitteena käytetty Suomensalpietari. Kivennäismaan kuusikolle taas parhaan kasvun antoi Metsän NP-lannos. Siellä lähes

samaan tulokseen päästiin lietetuhkalannoitteella, johon oli lisätty typpeä Suomensalpietarin muodossa. (Eloranta 2008, 43.)

3.3. Tutkimustietoa biolietteiden lannoitekäytöstä

Kaikilla kasvupaikoilla pelkällä tuhkalannoituksella ei saada maksimaalista lannoitushyötyä. Tämä koskee erityisesti lannoituksia kivennäismailla ja karuilla soilla. Siksi on tutkittu mahdollisuuksia täydentää tuhkan ravinnesisältöä muilla lannoitteilla tai lietteillä. Tuhkan käyttö yhdessä typpilannoitteen kanssa voi lisätä typpilannoitteen noin kymmenen vuoden vaikutusajan jopa kaksinkertaiseksi (Saarsalmi, Kukkola, Moilanen & Arola 2006, 125–127).

Tuhkalla ja typellä lannoitetuilla kivennäismaan koealoilla on havaittu selkeästi korkeampia hiilen ja typen mineralisaation ja kiertonopeuden arvoja kuin pelkällä typellä lannoitetuilla koealoilla (Saarsalmi ym. 2014, 93). Samoin tuhkalla+typellä lannoitetussa metsämaassa on havaittu 15 vuoden jälkeen korkeampia kalsium-, magnesium- ja fosforipitoisuuksia verrattuna kaupallisella typpilannoitteella lannoitettuihin koealoihin (Saarsalmi ym. 2010, 339). Liian suuri tuhkan määräkään yhdessä typen kanssa ei näytä olevan hyväksi, sillä 30 vuotta kestäneessä tutkimuksessa paras puuston kasvu on saatu 2,5 t/ha tuhkamäärällä. Kun tuhkan määrä korotettiin 5 tonniin hehtaaria kohti, puun kasvu oli alempi. Tutkimus koski 60-vuotiaan puuston kasvua kanervatyypin männikössä (Saarsalmi, Smolander, Kukkola, Moilanen & Saramäki 2012, 67). Jämsässä sijaitsevassa MT-kuusikossa verrattiin pelkän typen ja tuhkan+typen vaikutusta puuston kasvuun. Ensimmäisenä viitenä vuotena eroja ei juuri ollut, mutta kahtena seuraavana viisivuotiskautena typellä+tuhkalla lannoitetuilla koealoilla puun kasvu kiihtyi verratessa pelkällä typellä käsiteltyihin (Saarsalmi & Kukkola 2009, 66). Typen ja tuhkan käyttö yhdessä on siis todistettu hyväksi erilaisten metsätyyppien puita lannoitettaessa.

Metsäteollisuuden sivutuotteena syntyy erilaisia biolietteitä. Lietteillä on yritykselle aina arvo joko tuotteena, energiana tai jätteenä. Jätteenä lietteen arvo on yritykselle negatiivinen. Jätteiden hyödyntämistä ohjaavat suomalaisessa lainsäädännössä ympäristönsuojelulaki ja jätelaki. Lietteen käyttöä saattavat rajoittaa myös vesilaki ja terveydenhuoltolaki. (Sarkkinen 2012, 20–23.)

Perinteisesti biolietteitä on kuivattu ja poltettu yhdessä puun kuoren kanssa. Polttamista on käytetty sähkön- ja lämmöntuotantoon. Bioliete, eli sekundääriliete syntyy sellutehtaassa esiselkeytyksen jälkeen tehtävässä jäteveden biologisessa puhdistuksessa. Lieite sisältää mm. mikrobimassaa, puun uuteaineita, ligniiniyhdisteitä ja kuituja. (Matilainen, Pisto, Rinnepelto & Kinnunen 2013, 18).

Lietteitä olisi mahdollista hyödyntää myös lannoitteina. Hyödyntämisen mahdollistamiseksi lietteestä olisi ennen jalostamista saatava poistettua neste mahdollisimman hyvin. Biolietteet sisältävät ravinteista lähinnä typpeä. Erilaisissa selonteissa on nostettu esille jäteliemien käyttömahdollisuudet metsien lannoitteiden yhtenä komponenttina. Kiristynvä jätelainsäädäntö kannustaa kierrättämään kaikki biojätteet, jos se suinkin on mahdollista. Biolietteen käyttöä metsänlannoitteeksi kuitenkin hidastavat lannoitevalmistelain vaatimukset varsinkin pienimuotoisesti tapahtuvaan jäteliemien hyödyntämiseen. EU ei ole ottanut kantaa metsässä käytettäviin lannoitteisiin tai tuhkan käyttöön (Maa- ja metsätalousministeriön työryhmä 2008, 18).

Lannoitevalmisteasetus (MMM 12/07) estää orgaanisen lannoitevalmisteen käytön metsänlannoitteena. Metsänlannoitteen tulisi saada status lannoiterekisteriin ja tyyppinimi. Asetus on hidastanut lietelannoitteiden tutkimiseen ja kehittämiseen panostavien yritysten tavoitteita tuottaa uusia lannoitteita. Kehitystyötä tekeillä yrityksillä täytyisi olla varmuus tulevan tuotteen käytön luvallisuudesta, jotta kehitystyön rahoitus olisi helpompi järjestää. Kestävän kehityksen mukaista kehitystoimintaa on hankaloitettu suurteollisuuden parasta ajatellen. Suomalaisen jätelainsäädännön mukaan teollisesta prosessista poistettu aines on automaattisesti jätettä ja siksi käyttäminen vaatii useimmiten jäteluvan.

SIHTI-ohjelmassa on tarkasteltu mahdollisuuksia kostuttaa tuhkaa biolietteellä (Korpilahti 2003, 16). VTT taas on tutkinut yhdessä Metlan kanssa kasvihuoneolosuhteissa lietetuhkan vaikutusta männyn ja rauduskoivun kasvuun (Lindth ym. 2001, 46–52). Lietetuhkan käyttö todettiin tutkimuksessa yhtä tehokkaaksi kuin keinolannoitteilla lannoittaminen. Kokeessa ei tarkasteltu kasvun parantumista turvemaalla ja siinä tarkasteltiin vain taimivaiheessa olevien puiden kasvua.

Syystä tai toisesta edellisen seurantatutkimuksen jälkeen on biolietteiden metsälannoitekäytöstä tehty hyvin vähän varsinaisia käytännön tutkimuksia. Yksittäisiä kokeita on tehty mutta lupaprosessit, lietteen riittävän tasaisen laadun varmistaminen ja sopiva levitysteknologia lienevät pääongelmia biolietteen lannoitekäytön yleistymisen esteenä. Lisäksi suurin hyöty tulisi yritykselle vasta, jos lannoitteen valmistaminen voisi tapahtua suuressa mittakaavassa. Erilaisia teoreettisia tarkasteluja ja raportteja on sen sijaan kirjoitettu. Metlalla on meneillään vuosina 2013–2014 lupaava tutkimus "Lietteen jalostaminen lannoitteeksi ja energiatuotteiksi sekä lietelannoitteiden hyötykäyttö metsien lannoituksessa" (Projektit tutkimusteemoittain 2014). Tutkimus kuuluu ForestEnergy2020 tutkimus- ja innovaatio-ohjelmaan joka on Metlan ja VTT:n yhteinen hanke. Tämä tutkimus onkin tarpeellinen koskien lietteiden käytön soveltuvuutta metsänlannoitteeseen, varsinkin yhdessä tuhkan kanssa käytettynä.

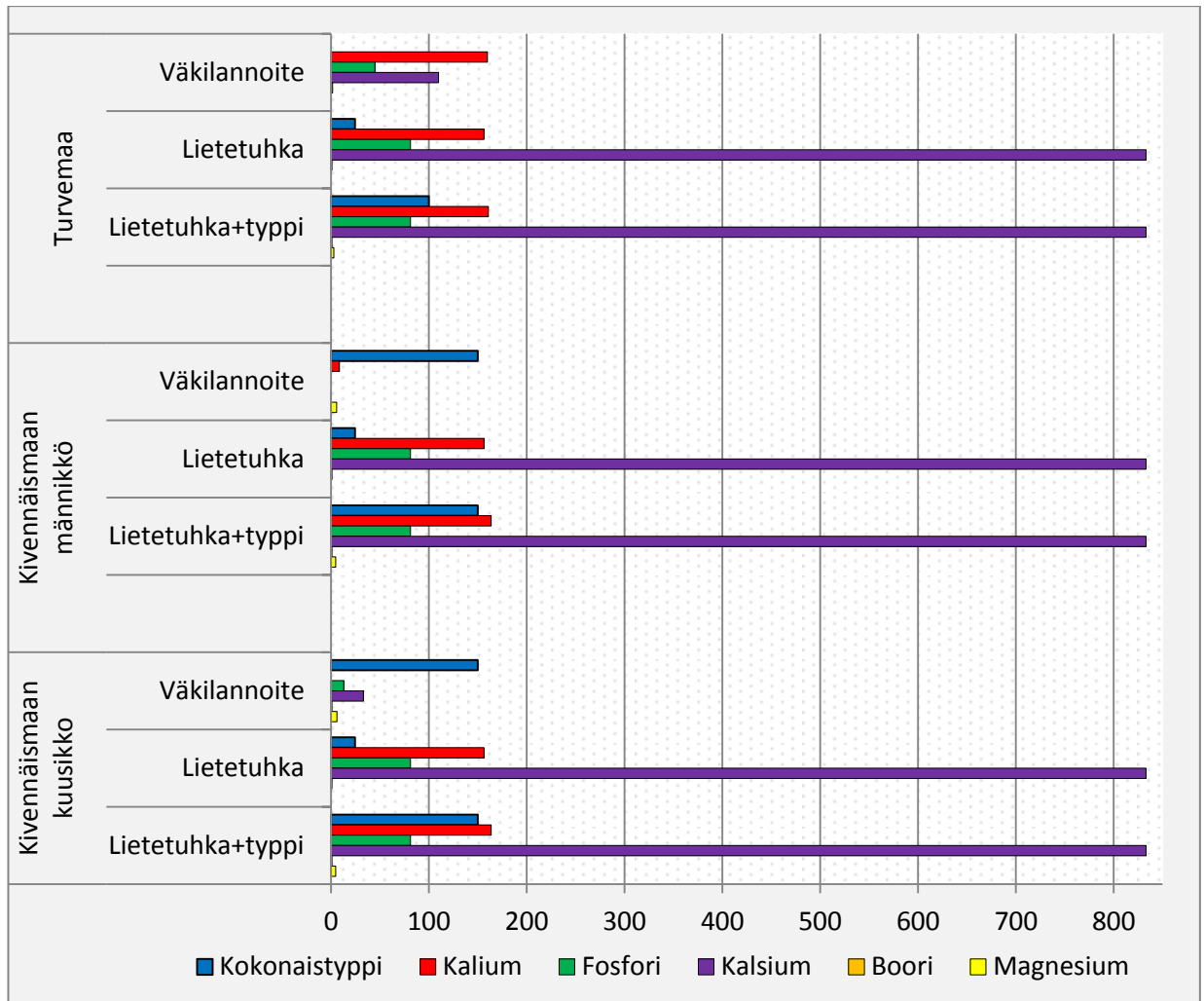
4 AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1 Vertailtavat lannoitteet

Tutkimuksessa tutkittavia koejäseniä oli neljä: lannoittamaton, väkilannoitteella lannoitettu, lietetuhkalla lannoitettu ja sellaisella lietetuhkalla lannoitettu, mihin oli lisätty typpeä. Lisättynä typpenä käytettiin Suomensalpietaria. Sitä lisättiin turvemaalla niin paljon, että lietetuhkan+typen sisältämä kokonaistyppimäärä oli 100 kg/ha. Kivennäismaan männikössä ja kuusikossa lannoitteen kokonaistyppimäärä oli 150 kg/ha. Väkilannoitteena käytettiin turvemaalla PK-lannoitetta. Kivennäismaan männikössä käytettiin väkilannoitteena Suomensalpietaria ja kivennäismaan kuusikossa Metsän NP-lannosta. (Niemelä 2002, 24–26.)

Humuspehtoori Oy:n valmistaman lietetuhkalannoitteen raaka-aineena käytettiin M-Realin Lielahden tehtaalta saatua tuhkaa ja biolietettä. Tuhka ja bioliete sekoitettiin yhteen suhteessa 1:2. Tuhka sisälsi osittain puu- ja osittain turvetuhkaa (Eloranta 2008, 18). Turvetuhkaa pidetään puun tuhkaa vaikealiukoisempana. Se sisältää myös ravinteita vähemmän kuin puun tuhka. Turvetuhka sisältää yleisesti vähemmän kaliumia ja booria kuin puun tuhka. Sen sisällöstä fosforilla on suuri osuus. Tutkimuksessa neljäntenä koejäsenenä olevaan lietetuhkaan oli lisätty typpeä Suomensalpietaria muodossa.

Käytetty tuhka ei ollut rakeistettua, vaan stabilointimenetelmänä on ollut itsekoveutus. Itsekovetuksessa tuhkaa varastoidaan tai siihen lisätään vettä, kunnes kosteus nousee 15–40 % tasolle (Rinne 2007, 3). Itsekovettuneena tuhkan sisältämät ravinteet liukenevat hitaammin maaperään kuin pölytuhkana levittäen.



Kuvio 1. Lannoitteiden sisältämät ravinteet (kg/ha) (Niemelä 2002, 25, Metsän kasvuohjelma, 30–31).

Kuviosta 1 voidaan havaita lietetuhkien sisältävän tavallisesti käytettyjä väkilannoitteita enemmän mm. fosforia, kaliumia ja hivenravinteita. Kalsiumin määrä voi näyttää suurelta, mutta se on tyyppillistä tasoa tuhkalannoituskohteilla. Juuri puun tuhkassa kalsiumia on runsaasti. Sen merkitys metsämaan ravinnekiertoa lisäävänä tekijänä on huomattava.

4.2 Koealat

Tutkimuksessa käytettävät koealat on perustettu Tuomarniemen opetusmetsiin Ähtäriin (Kuvio 2). Lannoituskoealoja on sijoitettu erilaisiin metsikköihin. Männiköiden kasvua seurataan sekä turvemaalla, että tuoreen kankaan kivennäismaalla.

Kivennäismaalla on myös lehtomaisen kankaan kuusikko, jonka kasvua seurataan.



Kuvio 2. Lietetuhkalannoituskokeiden sijaintikartta (Eloranta 2008, 52).

Jokaiselle kolmelle koealalle on perustettu 12 eri koeruutua (LIITE 1). Näistä kahdestatoista on siis kolme ruutua lannoittamatonta, kolme ruutua sopivalla väkilannoitteella lannoitettua, kolme ruutua lietetuhkalannoitteella lannoitettua ja kolme ruutua sellaisella lietetuhkalannoitteella lannoitettua, johon on lisätty typpeä. Koeruutujen suuri määrä lisää tutkimuksen luotettavuutta tuoden useita toistoja kullekin käsittelylle.

Tutkimuksessa mukana olevissa koealoissa oli tiettyjä haasteita, jotka eivät ole voineet olla vaikuttamatta mittaustuloksiin. Turvemaan männikön ojat alkavat olla tukkeutuneet ja perkauksen tarpeessa. Runsas puusto (noin 155 m³/ha) kylläkin haihduttanee niin paljon vettä, etteivät puiden juuret joudu hapettomiin olosuhteisiin. Hyvän metsänhoidon suositusten mukaan (2014, 131) jo alhaisempikin puuston määrä riittää haihduttamaan vettä riittävästi ilman toimivaa ojitusta.

Kivennäismaan kuusikko on jaettu kahteen eri palstaan. Kummankin kuusikon vieressä on hakkuuaukko. Koska riittävää vaippaa ei ole jätetty koealueiden viereen, myrskyt ovat kaataneet puita koealueilta. Viimeisin osoitus tämän puuttuvan vaiipan tarpeellisuudesta koettiin 16.11.2013, jolloin Eino-myrsky kaatoi kuusikkoa. Kahdelta koeruudulta kaatui kaikkiaan viisi kuusta, yksi kallistui ja lisäksi koealan ulkopuolelta kaatui koealoille muutamia puita. Viereiset hakkuuaukot ovat aiheuttaneet varmasti myös shokin osalle tutkittavista puista valaistusolosuhteiden muuttuessa ja auringon paahtaessa. Joidenkin koealojen lämpötila on noussut kohottamisen aluskasvillisuuden aktiivisuutta. Toinen aukko sijaitsee topografisesti koealueen yläpuolella. Kun aukosta on haihduttavat puut hakattu päätehakkuussa, valuu sieltä pintavesiä koeruuduille muuttaen alueen vesitaloutta.

Melko monella koeruudulla ovat puut kärsineet lumituhosta. Nämä näkyivät latvojen katkeamisina. Tutkimusalueilla on myös pystyyn kuivaneita puita. Selkeitä syitä näihin kuolemiin ei ole selvinnyt. Kaikki kuolleet ja kärsineet puut on pitänyt poistaa myös aiemmista laskelmista. Se on tarkoittanut laskentatöiden lisääntymistä. Koska kuolleiden puiden kasvu on ollut poikkeava verrattuna koealojen puiden keskikasvuihin, ovat myös mittaustulokset hiukan muuttuneet aiemmista.

Koeruutujen koot ovat kivennäismaan männikössä 0,09 ha, muualla 0,06 ha. Niiden muotona on suorakulmio ja koeruudut on erotettu toisistaan viiden metrin le-

vyisellä vyöhykkeellä. (Niemelä 2002, 24.). Koealueiden reunalla kasvavien puiden juuret ovat siis saattaneet ylettyä myös viereisen koealan puolelle. Tämä asia on vaikuttanut jonkin verran tutkimukseen tuloksiin.

4.3 Puuston mittaukset

Lannoituskoe aloitettiin vuonna 2001. Silloin mitattiin lannoitettujen alueiden puusto sekä suoritettiin maaperä- ja neulastutkimukset. Puusto mitattiin Metsäntutkimuslaitoksen metsikkökokeiden maastotyöohjeen (1987, 41) mukaisesti.

Kaikista puista mitattiin rinnankorkeusläpimitta. Mittaus tapahtui ristiinmittauksena, joka vähensi runkojen epäpyöreiden aiheuttamaa virhettä. Osa puista on tutkimuksen alkaessa valittu tarkemmin mitattaviksi koepuiksi. Koepuita on noin kaksi kolmasosaa koko puumäärästä. Näistä puista mitattiin rinnankorkeusläpimitan lisäksi yläläpimitta kuuden metrin korkeudelta sekä pituus. Koealojen puut yksilöitiin numeroimalla jo vuonna 2001. Numerointi vahvistettiin maalilla mittauksen yhteydessä 2012. Näin metsän kasvua on voitu seurata puukohtaisella tarkkuudella.

Tässä tutkimuksessa puuston mittaukset tehtiin talven 2012–2013 aikana. Rinnankorkeusläpimitan mittauskohta oli merkitty puihin jo aiemmissa tutkimuksissa poikkiviivalla. Mittausvälineenä käytettiin mekaanisia mittasaksia, joiden tarkkuus oli 1 mm.

Puun pohjapinta-alaksi kutsutaan puuaineksen pinta-alaa, joka tulisi näkyviin, jos puu sahattaisiin poikki 1,3 metrin korkeudelta. Pohjapinta-ala pystytään siis laskemaan rinnankorkeusläpimitan perusteella.

Kuuden metrin korkeudesta tapahtuvassa läpimitan mittauksessa oli omat haasteensa. Mittaus suoritettiin Metlan mekaanisilla mittasaksilla, jotka olivat 4,7 m varren päässä. Varren alapää kohdistettiin 1,3 m viivalle puun runkoon. Mittausasteikko oli pitkän varren alapäässä. Asteikolle läpimittatieto siirtyi ylhäältä vaijerin välityksellä. Ennen mittauksen aloittamista mitta kalibroitiin 100 mm puukappaleella. Sekä ylä-, että alaläpimittaa mitatessa oli tärkeää, että mittasaksien ja puun välissä ei ollut oksankiehkuroita, naavaa tai pieniä oksia.

Koepuiden pituudet mitattiin Vertex-mittalaitteella. Laitteen mittausten menetelmä perustuu ultraäänen ja nousukulma-anturin hyödyntämiseen. Vertex-mittalaitteen tarkkuus on yksi desimetri. Ennen mittausta mittalaitteen tuli olla riittävän kauan ulkolämpötilassa, jotta lämpötilaero laitteen ja ulkoilman väliltä poistuu. Seuraavaksi suoritettiin kalibrointi 10 metrin mitan avulla. Puiden pituusmittauksessa mittalaitteen lähetin aktivoitiin ja kiinnitettiin mitattavaan puuhun rinnankorkeudelle. Mittaus tuli suorittaa suunnilleen puun korkeuden etäisyydeltä puun rungosta. Mittalaite antoi puun pituuden 10 sentin tarkkuudella. Samalla laite ilmoitti mittaajan ja mitattavan puun välisen etäisyyden.

Puun pituuden tarkka mittaus on aina vaikeampaa kuin läpimitan mittaaminen. Yksittäisen puun mittaamiseen voi tulla virhe, joka paljastuu vasta kun mittaus toistetaan. Pituuden mittaamisessa oli laitteen tarkkuutta suurempi vaikutus itse mittaustapahtumalla. Tarkka puun latvan näkeminen oli varsinkin kuusikossa haasteellista. Mittaustuloksen kannalta oli tärkeää myös, että käsi pysyi mahdollisimman vakaana koko mittaustapahtuman ajan.

Mitattavat suureet ja puuyksilöt pysyivät samoina kuin edellisissä tutkimuksissa. Ainoastaan koealoilla viime vuosien aikana kuolleet puut toivat muutoksia edellisiin tutkimuksiin. Toisena poikkeuksena olivat kivennäismaan männikön koealat. Niissä suoritettiin vuoden 2013 syksyllä harvennus. Jäävän puuston tilavuus oli laskettava erikseen, jotta seuraavassa tutkimuksessa voidaan ottaa kantaa harvennuksen ja eri lannoitevaihtoehtojen yhteisvaikutuksiin.

Kuten aiemmassakin tutkimuksessa, puista mitattiin erotusmenetelmällä eri lannoitteiden aikaansaama lisäkasvu. Lannoitusvaikutusten ilmentäjänä käytettiin puuston keskiläpimitan, pohjapinta-alan ja kuutiomäärän kasvua yhdentoista vuoden ajalta. Tämä aika jaksottui kahteen osaan, ensimmäiseen viiteen vuoteen ja jälkimmäiseen kuuteen vuoteen.

4.4 Mitattujen puustotunnusten tilastollinen käsittely

Puuston mittaustulokset kirjoitettiin metsässä käsin paperille ja siirrettiin siitä Excel-taulukkolaskentaohjelmaan. Paperilla oli pohjana edellisen tutkimuksen mit-

taustulokset, joten kuolleet puut ja isot virheet mittaustapahtumassa paljastuivat välittömästi. Myöhemmin tulokset käsiteltiin Metsäntutkimuslaitoksen KPL-ohjelmistolla (Heinonen 1994). Sillä saatiin laskettua puusto- ja puutunnuksia mitattujen suureiden perusteella.

DOS-pohjaisella KPL-ohjelmalla saadut tulokset koottiin vielä yhteen ja lopulliset kasvupaikka- ja lannoitekohtaiset tulokset laskettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Tällä ohjelmalla myös luotiin tietoja käsittelevät pylväsdiagrammit osittain virherajoineen.

Tutkimuksen olennaisin sisältö oli erilaisin lannoittein aikaansaatu puiden tilavuuskasvu kuluneen 11 vuoden aikana. Tämä aineisto käsiteltiin tarkemmin SPSS-tilasto-ohjelmalla. Ohjelmalla laskettiin puuston kasvun eroja vertaamalla eri lannoitteilla saatujen kasvutulosten keskiarvoja toisiinsa. SPSS-ohjelmalla tutkittiin myös lannoitettujen puustojen tilavuusmittaustulosten erojen merkittävyyttä verrattuna nollaruutuun. Jos tuloksissa oli jonkin lannoitteen antamissa kasvutuloksissa suuri vaihteluväli, lannoitteen antamaa lisäkasvua ei voinut pitää merkittävänä, vaikka keskiarvo olisikin ollut korkea verrattuna nollaruudun kasvutuloksiin.

Eri lannoitteiden lisäämää kasvua verrattiin kontrolliruuduilla kasvavien puiden kasvuun. Tilastollisessa tarkastelussa nollahypoteesiksi asetettiin oletamus, jossa eri käsittelyvaihtoehtojen muuttujien keskiarvojen välillä ei ollut eroja ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$). Vaihtoehtoisena hypoteesina käytettiin olettamusta, jossa eri käsittelyvaihtoehtojen muuttujien keskiarvojen välillä oli tilastollisia eroja ($H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ tai $\mu_1 \neq \mu_3$ tai $\mu_1 \neq \mu_4$ tai $\mu_2 \neq \mu_3$ tai $\mu_2 \neq \mu_4$ tai $\mu_3 \neq \mu_4$). (Heikkilä 2004, 189–193.)

Havaintoaineisto jaettiin eri lannoitusvaihtoehtojen muodostamiin ryhmiin. Lannoitteiden vaikuttamaa puiden tilavuuskasvujen keskiarvoja verrattiin kokeittain yksisuuntaisella varianssianalyysillä, koska oletettiin lannoitettujen koealojen puiden kasvun olevan kontrolliruudun puuston kasvua suurempaa. Varianssianalyysissä kokonaisvaihtelu jaettiin ryhmien sisäiseen ja ryhmien väliseen vaihteluun (Heikkilä 2005, 224–226). Lannoituskäsittelyjen pareittainen vertailu tunnusten keskiarvojen suhteen tapahtui Tukey'n testillä. Sen avulla testattiin, oliko eri lannoitusvaihtoehtojen muodostamien ryhmien välinen vaihtelu huomattavasti suurempaa kuin

ryhmien sisäinen vaihtelu. Jos testin antama p-arvo oli alle 0,05, eroa voitiin sanoa tilastollisesti melkein merkitseväksi. Jos p-arvo oli alle 0,01, ero oli merkitsevä ja jos alle 0,001, ero oli erittäin merkitsevä.

4.5 Neulasnäytteiden näytteenotto ja analysointi

Lannoituksen vaikutusta neulasten ravinnepitoisuuksiin seurattiin kaikilla turve-maan männikön koeruuduilla (LIITE 2). Edellisessä seurantatutkimuksessa tehtiin samoin. Vaikka puiden pituus oli turvemaalla alhaisinta koko tutkimuksessa, olivat nämäkin männyt kasvaneet jo noin 17 metrin pituisiksi. Pituuskasvua tutkimuksen alusta oli siis tullut noin 3 metriä.

Puiden pituus ei antanut monia vaihtoehtoja näytteiden keräämistävalle. Neulasnäytteet kerättiin mäntyjen latvoista haulikolla ampumalla. Edustava näyte edellytti 5 – 10 puun kasvaimien keräämistä yhtä koeruutua kohti. Näytteet kerättiin keskitalvella, jolloin puut olivat lepotilassa. Talvi on sopiva aika neulasten analysointiin, koska kasvukaudella ravinnepitoisuudet neulasissa vaihtelevat huomattavasti. Moilasen ym. (2005, 91) mukaan kasvukaudella helposti liikkuvat ravinteet siirtyvät uusiin neulasiin ja kasvupisteisiin. Ohjeen mukaan neulasnäytteet pyrittiin saamaan puiden latvojen etelän puolen ylimmistä oksankiehkuroista. Näytteiden keruu ampumalla onnistui sinänsä hyvin. Ongelmaksi muodostui se, miten putoava näyte saataisiin maahan. Monesti, varsinkin tuuheatlaisissa puissa, näyte jäi muiden oksien päälle eikä pudonnut maahan asti. Riittäväillä toistoilla näytteiden ampuminen kuitenkin onnistui.

Neulasnäytteitä kerättiin jokaiselta koeruudulta noin kuudesta puusta. Näytteet koottiin yhteen niin, että jokaiselta koejäseneltä saatiin yksi yhteinen näyte. Kolmelta samalla lannoitteella käsitellyltä koeruudulta tuli siis aina yksi yhteinen näyte.

Neulasnäytteiden analysointi teetettiin Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:ssä Mikkelissä liitteessä 6 esitetyin menetelmin. Typpipitoisuuden mittaamiseen käytettiin Kjeldahl/Dumas -menetelmää. Muiden ravinteiden määrä mitattiin kuivapolton ja suolahappouuton avulla.

4.6 Maanäytteiden näytteenotto ja analysointi

Lietetuhkalla+typellä lannoitetuista koealoista otettiin maanäytteet. Kuten edellisessäkin tutkimuksessa, turvemaalta otettiin maanäytteet 0–10 cm ja 10–20 cm maakerroksista. Kivennäismaalla näytteet otettiin humuskerroksesta sekä 0–10 cm ja 10–30 cm syvyyksistä. Näytteenotto onnistui vaivatta lukuun ottamatta kivennäismaan kuusikon koeruutua 10. Sen kivisyys hankaloitti maanäytteiden ottamista.

Näytteet otettiin kokoomanäytteinä kultakin tutkittavalta koealalta Metsäntutkimuslaitoksen metsikkökokeiden maastotyöohjeiden (1987) mukaisesti. Turvemaalla näytteenottokohdista poistettiin aluksi maan pinnan elävä kasvillisuus ja mahdollinen raakahumus. Maanäytteiden näytteenotto tapahtui lapiolla. Saadusta lapiollisesta mitattiin mittanauhalla näytteenottokohdat vaadittavilta syvyyksiltä. Yhteen kokoomanäytteeseen koottiin näytteet koealan keskeltä, sekä keskipisteen ja koealan kulmapaalojen puoliväleistä. Saadut näytteet yhdistettiin sangossa, josta erotettiin tutkittavaksi lähetettävä näyte puolen litran rasiaan.

Maanäytteiden analysoija kilpailutettiin neljän palveluntarjoajan kesken. Näytteet analysoitiin Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:ssä liitteen 5 menetelmin. Happamuus mitattiin maa-vesi -seoksesta. Typen määrä analysoitiin Kjeldahl- ja Dumas-menetelmillä. Fosforin määrä tutkittiin uutolla happamaan ammoniumasetaattiliuokseen ja käyttäen ammoniummolybdaatti-kompleksin spektrofotometriasta mitausta. Muidenkin ravinteiden uuttaminen tapahtui samanlaiseen liuokseen mutta mittaus tehtiin ICP:llä (induktiivisesti kytketty plasmaspektrometria).

4.7 Harvennus

Koealojen puustot ovat kasvaneet runsaasti yli kymmenen tutkimusvuoden aikana. Turvemaan männikössä ei ole harvennusmallien perusteella vielä tarvetta puuston harventamiseen. Kivennäismaan kuusikoissa puiden rinnankorkeusläpimitat lähenevät 22 senttiä, joten ne ovat jo uudistuskypsiä. Kuusikko on niin iäkästä, että sen harventaminen ei suuremmin parantaisi jäävien kasvua. Kivennäismaan män-

niköissä harvennustarve oli jo ilmeinen. Koealojen harvennus suoritettiin vuoden 2013 syksyllä.

Puuston pohjapinta-ala ennen harvennusta oli yli 28 m²/ha. Koska pohjapinta-alalla painotettu keskikorkeus oli noin 22 metriä, havaittiin harvennusmallista harvennustarve (Kuvio 3). Harvennustapana käytettiin lähinnä alaharvennusta. Harvennettavat puut valittiin tarkasti. Liian tiheässä kasvanut puusto oli vaikuttanut alemmassa latvakerroksessa kasvavien puiden latvuksiin neulaston vähenemistä.

Laatuharvennuksen tapaan poistettiin myös puita jotka olivat lenkoja, mutkaisia tai muuten vahingoittuneita. Vikaisten puiden poistaminen nostaa luonnollisesti jäävän puuston päätehakkuuarvoa kohottamalla laadukkaiden tukkipuiden osuutta. Harventamisella onkin merkityksensä puuston hygieniaan. Alispuustoksi jääneet, valon- ja ravinteidenpuutetta potevat puut joutuvat helposti kärsimään kasvituhoitusta. Myös lumituhojen vaara on ilmeinen. Kasvamaan jätettävissä puissa oli aikaisempaa enemmän sellaisia, joissa kasvoi oksia joka puolella latvaa. Tämä oli yksi yhteyttämistehoa parantava harvennuksen vaikutus. Alispuustossa latvusten oksat puuttuvat usein joltain puolelta lähes kokonaan varjostuksen vuoksi. Ainoastaan yhdessä poistettavassa rungossa havaittiin tervasrosoa. Lannoitevaikutusten seuraamiseksi koealoille jätettiin kuitenkin myös oksaisempia ja kaksihaaraisia puita, jotta tietty epähomogeenisuus alueella säilyy. Harventaminen antaa mahdollisuuden puiden paksuuskasvun tarkasteluun poistettujen puiden kantojen vuosilustoja tutkimalla.

Harvennuksen tuloksena tarkemmin mitattavien koepuiden suhteellinen määrä kasvoi. Tämä lisää tutkimuksen laatua tulevaisuudessa. Koepuiksi on valittu pohjapinta-alaa painottaen runsaasti suurempia valtapuita. Näistä useimmat jatkavat harvennuksen jälkeen kasvuaan. Monet poistetuista puista taas olivat sellaisia, joista oli tutkimuksessa mitattu ainoastaan rinnankorkeusläpimitta.

Harventamalla metsää puuston koko tuotto saadaan tarkemmin talteen (Hänninen 1998, 81). Muussa tapauksessa luonnonpoistuma verottaa varsinkin puita jotka ovat jääneet isompien puiden alle. Harventamisessa ravinteet menevät uudelleenjakoon. Ravinteita on puuta kohti enemmän käytössä puiden lukumäärän vähentyessä. Lisäksi hakkuutähteistä vapautuu ravinteita ainakin muutamaksi vuodeksi.

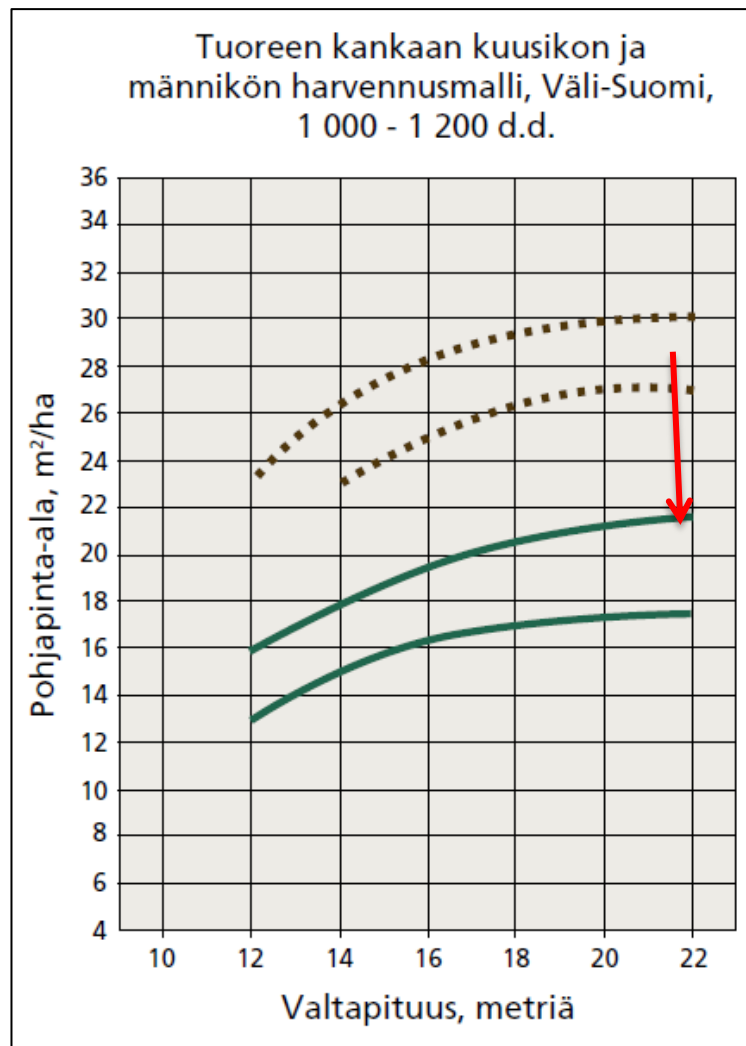
On todettu, että harvennus hyödyttää pintakasvillisuutta jopa puita enemmän. Pintakasvillisuus on puita tehokkaampi ravinteiden ottaja. Siksi se käyttää esimerkiksi harventamisessa vapautuvaa typpeä, jolloin puusto voi kärsiä entistä pahemmasta typen puutteesta. (Päivinen 1999, 33.) Penttilän ym. (2005, 125) mukaan harvennuksen jälkeen on havaittu latvusten yläosissa fosforin ja kaliumin määrän lisääntymistä.

Harventamisen seurauksena tapahtuva maanpinnan lämpötilan kohoaminen on merkittävä puiden kasvun lisääjä. Se edistää metsän ravinnekiertoa ja juurten kasvua. Joidenkin tutkimusten mukaan harvennus voi nostaa lämpötilaa aluskasvillisuuden ympärillä parikin astetta. Kun puita kasvaa harvemmassa, lumipeite paksune hoitamattomaan metsään verrattuna. Rouda ei etene talvisin niin syvälle ja keväällä se sulaa harvennetussa metsässä nopeammin. (Hynynen, Valkonen & Rantala 2005, 78.)

Metsikön pienilmasto muuttuu harvennuksen seurauksena. Lämpöä ja valoa riittää enemmän. Myös ilma liikkuu ja sekoittuu tasaisemmin harvennetussa metsässä. Ilman liikkuminen pitää hiilidioksidipitoisuuttakin tiheää metsää tasaisempaan. Maanpinnan ilmanvaihdon paranemisella on myönteinen vaikutus aluskasvillisuuden hajotustoimintaan. (Hynynen ym. 2005, 25.)

Leimauksessa poistettavien puiden eri puolille sumutettiin spraymaalilla punaiset täplät. Koska eri koealoilla puuston alkuperäinen tiheys vaihteli, seurasi siitä eroja myös harvennusvoimakkuudessa. Koealoilta poistettavien puiden määrä vaihteli 10 ja 31 puun välillä. Lopputuloksena keskimääräinen pohjapinta-ala oli 21,44 m²/ha. Tämä tarkoitti, että harvennuksella päästiin tavoiteltuun puuston määrään, kuitenkin enemmän harvennusmallin haarukan ylärajalle. Poistuma hehtaaria kohden oli keskimäärin 69,7 m³ (LIITE 4).

Toisilla koealoilla, kuten kolmosruudussa, männikön alle oli kasvanut tiheä kuusialikasvusto. Laadukas harventaminen edellytti korjuumiehille näkemäesteitä muodostavan alipuuston poistamista raivaussahalla ennen hakkuuta.



Kuvio 3. Harvennuksen muutos metsikön pohjapinta-alaan ja pituuteen (Metsänhoidon suositukset 2006, 96).

Kun puut kasvavat riittävän tiheässä, ne kilpailevat keskenään ja kasvureaktio erityisesti pituuskasvun suhteen on voimakas. Liika tiheys taas vaikeuttaa heikoimpien puuyksilöiden selviämistä. Harvennusmallit antavat liikkumavaraa harventamisen ajankohdan suhteen. Jos metsä on kasvanut kovin tiheänä, sitä ei kannata harventaa aivan tavoiterajojen alatasolle. Liian voimakas harventaminen tuo muun muassa kasvaneen tuulituhojen riskin. Harventamista on puiden terveyden kannalta järkevämpää tehdä liian usein kuin liian harvoin. Tällöin latvukset pysyvät elinvoimaisempina. Latvuksista huolehtimalla huolehditaan myös juurista (Hynynen ym. 2005, 80). Juuretkin kilpailevat elintilastaan, ravinteista, vedestä ja joskus myös hapestaa maan alla. Vastakkaista näkökulmaa voidaan perustella sillä, että varsinkin kesällä tehdyssä harvennushakkuussa on aina sieni- ja kääpäthuhojen riski.

Metsänlannoituksen ja harventamisen yhteisvaikutuksena saadaan aikaan arvokasvua. Arvokasvussa puuston arvo kasvaa tilavuutta voimakkaammin. Tämä tarkoittaa, että muuten kuitupuuta kasvava metsä kasvaa niin suureksi, että enenevä osa siitä voidaan myydä enemmän tuloja tuottavana tukkipuuna. Tukkipuiden osuus puusaannosta suurenee nopeasti kun puuston rinnankorkeusläpimitta saadaan lähelle 20 senttiä. Harventamisessa metsän kasvu suunnataan parhaille puuyksilöille. Tulevien hakkuiden korjuukustannukset alenevat harvennuksen seurauksena. Kun runkojen keskijäreys kasvaa, puunkorjuusta tulee jatkossa tehokkaampaa (Penttilä ym. 2005, 122).

Harventaminen lisää puuston paksuuskasvua enemmän, suhteessa pituuskasvuun. Kärkkäisen (2007, 25) mukaan sen saattaa aiheuttaa puun altistuminen tuulelle. Tuulen taivuttaessa puuta tapahtuu pietsosähköinen ilmiö, joka vaikuttaa puun solukkoon ja aiheuttaa paksuuskasvua tyviosassa. Pietsosähköisessä ilmiössä tilavuuden tai pituuden muutos aiheuttaa muutoksen sähkökentässä. Sama ilmiö voi toimia myös toisinpäin.

Metsikön tiheys ja kilpailu viereisten puiden kanssa vaikuttavat suuresti paksuuskasvuun. Harventamisen seurauksena puuston runkomuoto muuttuu enemmän lieriön mallisesta kartioksi, eli puista tulee tyvekkäämpiä. Tiheissä metsissä paksuuskasvu on voimakkainta latvuksessa ja puun yläosissa. Harvennuksen jälkeen kasvu keskittyy puun alimpaan kolmannekseen. Koska tutkimuksessa käytetään kolmen muuttujan tilavuusyhtälöä puiden tilavuuden määrittämiseen, runkomuodon muutos saadaan hyvin esille. (Hynynen ym. 2005, 25.)

Seuraavassa tutkimuksessa voidaan saada jo näyttöä siitä, miten harventamisen ja lannoitteen yhteisvaikutus näkyy kivennäismaan männikön kasvun kohdentumisessa. Harventaminen tulee vaikuttamaan puuston järeytymiseen myös niillä koelohjoilla, joita ei ole lannoitettu.

Tämän opinnäytetyön kivennäismailla on tilanne, joissa lannoituksesta saatava kasvunlisäys jakautuu kuitupuuta enemmän tukkipuille. Männikössä tehty harvennus vielä korostaa ilmiötä. Samaan aikaan, kun lannoitus aikaistaa hakkuutulojen saantia, se vaikuttaa myös puiden ominaisuuksiin. Lannoitus vähentää puuaineksen tiheyttä noin 5 % (Makkonen & Häggman 2008, 13). Nykyisellään puuainek-

sen tiheys ei vaikuta kantohintaan vähentävästi. Laatuhinnoittelu tekee kuitenkin tuloaan Suomenkin puumarkkinoille.

Taulukko 2. Kivennäismaan männikön puustotunnukset ennen ja jälkeen harvennuksen (ppa=pohjapinta-ala, $d_{1,3}$ =läpimitta 1,3 m korkeudelta, h=pituus).

ppa ennen harvennusta:	28,2 m ² /ha
ppa harvennuksen jälkeen:	21,4 m ² /ha
ppa:n vaihtelu eri koeruuduilla:	19,3–23,7 m ² /ha
$d_{1,3m}$ ennen harvennusta:	22,8 cm
$d_{1,3m}$ harvennuksen jälkeen:	23,5 cm
h ennen harvennusta:	21,7 m
h harvennuksen jälkeen:	21,9 m

Taulukko 3. Harvennuspoistuma kuvioittain kivennäismaan männikössä (ppa=jäljelle jääneen puuston pohjapinta-ala).

Koeala	m³/ha			m²/ha
	Alkup. tilavuus	Harvennuspoistuma	Jäävä tilavuus	Jäävä ppa
1/III	315	56	259	23,2
2/IV	295	54	241	20,8
3/II	313	87	227	21,1
4/II	279	62	217	21,3
5/I	216	39	177	19,3
6/IV	268	69	199	19,6
7/III	341	109	232	22,6
8/I	268	75	193	19,6
9/IV	319	76	243	22,5
10/II	311	74	237	22,3
11/III	278	64	215	21,3
12/I	316	72	245	23,7

5 TULOKSET

Metsänlannoituksen vaikutusten tarkastelu on pitkäjänteistä työtä. Talousmetsissä tyypillisenä puiden kiertoaikana käytetään 60–100 vuotta. Siksi lannoituksen lopullisten vaikutusten selviäminen kestää vuosikymmeniä. Vaadittavan ajan lisäksi lannoitekokeilta vaaditaan riittävää laajuutta olosuhteista aiheutuneiden erojen eliminoimiseksi.

5.1 Lannoituksen vaikutus puuston ilmiäsuun

Pitkän ajan kuluessa lannoitus vaikuttaa myös puiden ulkonäköön. Vaikutus ei ole samaa tasoa kuin vaikkapa harvennuksen aiheuttamat muutokset. Tasapainoinen ravinteiden saanti on kuitenkin edellytys sille, että oksat, neulasen ja puun kuori kasvavat normaalisti. Ravinteiden puute voi vaikuttaa myös runkomuotoon, haaraisuuteen ja monilatuaisuuteen.

Ravinteiden puute näkyy erityisesti neulasten koossa ja värissä. Myös muita suuremman luokan kasvuhäiriöitä voi ilmetä. Esimerkiksi boorin puutteesta kärsivät männiköt saattavat olla mutkaisia, oksikkaita ja tyvekkäitä (Hakkila & Kalaja 1983, 17). Tällöin kyse alkaa olla jo terveyslannoituksen tarpeesta. Tämän tutkimuksen metsissä ei ollut kuitenkaan kyse terveyslannoituksista, vaan lannoituksista puuston tilavuuden parantamiseksi. Metsiköt olivat siis jo alkutilanteessa ravinnetilaltaan normaalissa kasvukunnossa.

Eri koejäsenten kesken ei ollut vielä silmin havaittavia eroja puiden ulkonäössä. Jos jollain koeruudulla olikin yksittäisiä, hiukan harsuuntuneita puita, kyse oli todennäköisesti muusta olosuhdetekijästä. Puuston ilmiäsuun tarkasteluun toi oman haasteensa se, että nuorimpienkin metsiköiden puut olivat jo keskimäärin 17 metrin pituisia. Nimenomaan puiden latvoista voidaan havaita parhaiten mahdolliset lannoituksen aiheuttamat muutokset. Silmin oli hankala havaita tuolla korkeudella tapahtuvia muutoksia.

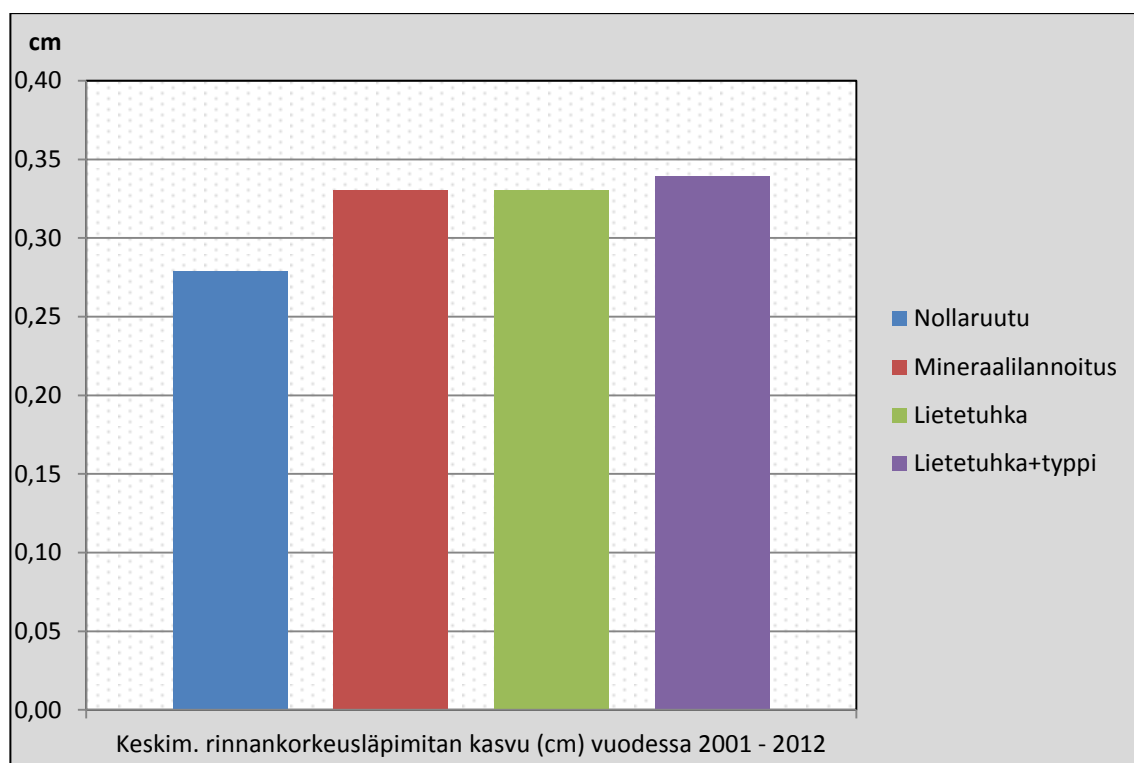
Edellä kuvattujen asioiden vuoksi lannoituksen vaikutuksesta puiden ulkonäköön ei oteta tässä tutkimuksessa kantaa. Tulevaisuudessa asia on silti tutkimisen arvoinen ja erotkin tulevat varmasti paremmin näkyviin.

5.2 Lannoituksen vaikutus keskiläpimitan kasvuun

Tutkittavista puista mitattiin keskiläpimitta 1,3 metrin korkeudelta. Kun tulokset syötettiin KPL-laskentaohjelmistoon, se ilmoitti koealakohtaiset rinnankorkeusläpimitat pohjapinta-alalla painotettuina. Saadut puustotunnusten arvot on esitetty koealakohtaisesti liitteessä 7. Lannoitettujen alojen puiden läpimittojen kasvua verrattiin kontrolliruutujen puiden läpimittojen kasvuun. Turvemaan männikössä läpimitan vuotuinen kasvu oli 2001–2006 lietetuhka+typpi -koealoilla parhaana 35 % kontrolliruutua parempi. Kontrolliruudulla puuston keskimääräinen läpimitan kasvu oli 0,25 senttiä vuodessa. Myös väkilannoitteella päästiin 30 % lisäkasvuun. Pelkkä lietetuhkalannoite antoi 22 % kasvunlisäyksen.

Seuraavien kuuden vuoden aikana tilanne muuttui erilaiseksi. Pelkällä lietetuhkalla lannoitettujen mäntyjen läpimitan lisäkasvu oli tänä aikana suurinta, 16 % verrattuna nollaruudun tulokseen. Eniten läpimitan kasvu hiipui lietetuhkalla+typellä lannoitetuilla aloilla. Niissä mäntyjen lisäkasvu oli enää 13 %. Väkilannoitteenkin antama lisäkasvu oli 2006–2012 vain 11 %.

Koko tutkimusjaksolla turvemaan männikössä eri lannoitteiden vuotuiset läpimittojen keskikasvut olivat varsin samansuuruisia. Verrattuna nollaruutuun (0,28 cm/vuosi) kaikki lannoitteet antoivat rinnankorkeusläpimitoille noin 20 % lisäkasvun.

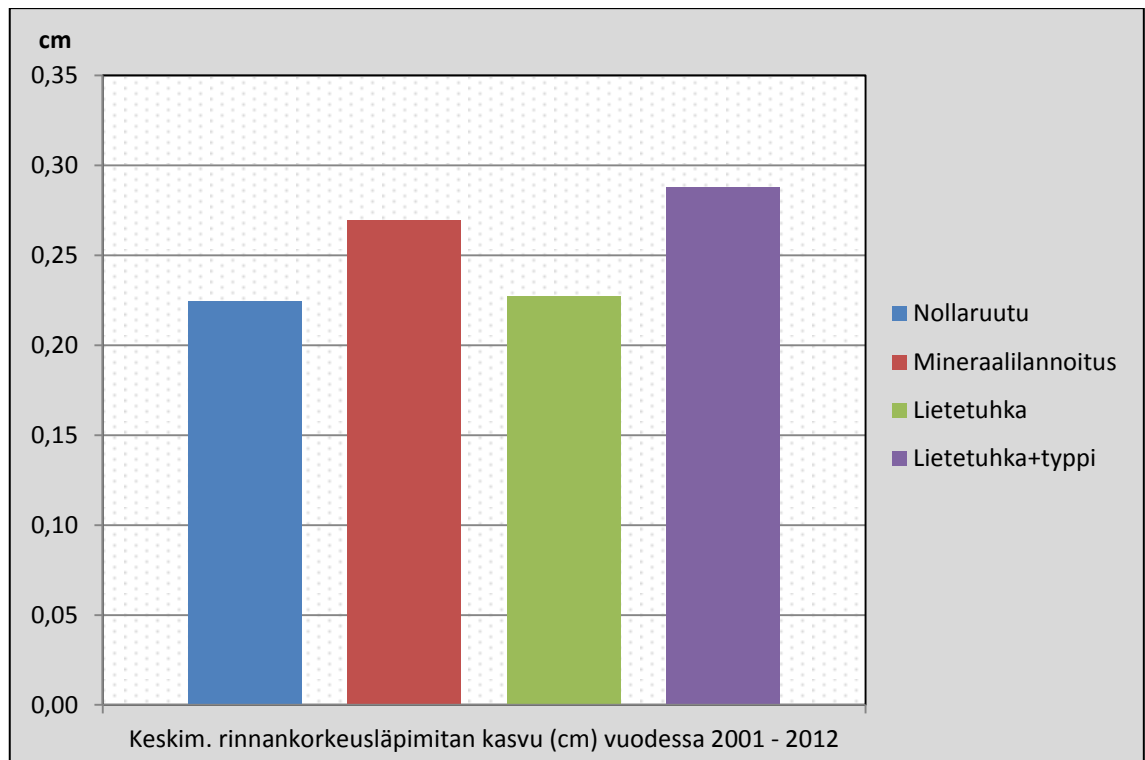


Kuvio 4. Puuston keskimääräinen rinnankorkeusläpimitan kasvu turvekankaan männikössä 2001–2012.

Kivennäismaan männikössä ensimmäisen viiden vuoden aikana puuston keskiläpimitta kasvoi väkilannoituksella käsiteltyjen koeruutujen puissa yli 50 % verrattuna kontrolliruutuun (0,21 cm/a). Myös lietetuhkalla ja lisätyypellä lannoitetut puut kasvoivat noin 40 % nollaruutuja paremmin. Pelkällä lietetuhkalla lannoittaen läpimitassa ei havaittu lisäkasvua.

Seuraavalla kuusivuotiskaudella, 2006–2012, väkilannoitus ei antanut enää kasvua mäntyjen läpimitan kasvuun. Myöskään lietetuhkalla lannoitetut männyt eivät kasvattaneet läpimitaansa juurikaan kontrolliruutua enempää. Sen sijaan lietetuhkalla+tyypellä lannoitettujen mäntyjen rinnankorkeusläpimitan kasvu oli yhä noin 20 %.

Koko 11 vuoden tutkimusaikana läpimittojen lisäkasvu oli kuvion 5 mukainen. Väkilannoitetussa männikössä kasvu oli 20 % ja lietetuhkalla+tyypellä 28 % verrattuna kontrolliruutujen puiden läpimitan kasvuun.

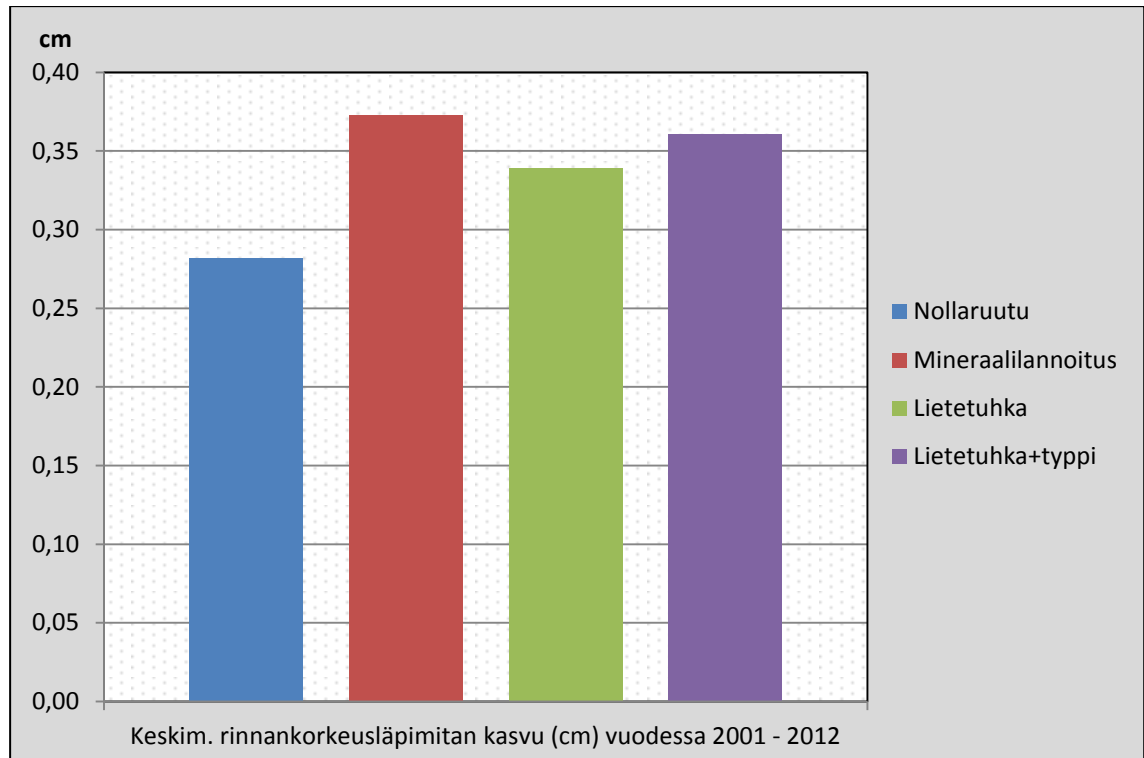


Kuvio 5. Puuston keskimääräinen rinnankorkeusläpimitan kasvu kivennäismaan männikössä 2001–2012.

Kivennäismaan kuusikossa väkilannoitteen antama rinnankorkeusläpimitan lisäkasvu oli suurinta tutkimuksen ensimmäisen viiden vuoden aikana. Lisäkasvu verrattuna lannoittamattomaan puustoon oli peräti 48 % (0,13 cm/a). Lisätyypellä vahvistettu lietetuhka antoi sekin 36 % lisäkasvun. Lietetuhkan tuoma lisäkasvu oli 24 %. Nollaruudulla läpimitta kasvoi 0,28 cm vuodessa.

Seuraavan kuuden vuoden aikana kaikkien lannoitteiden antama vuotuinen läpimitan lisäkasvu oli noin 20 %.

Koko tutkimusajanjaksona, 2001–2012, väkilannoitteella lannoitettu kuusikko kasvatti läpimittaansa keskimäärin 32 % (0,09 cm/a) enemmän kuin vertailuruutu. Lisätyypellä vahvistettu lietetuhka antoi 28 % lisäkasvun. Pelkän lietetuhkan antama tulos oli 20 %.



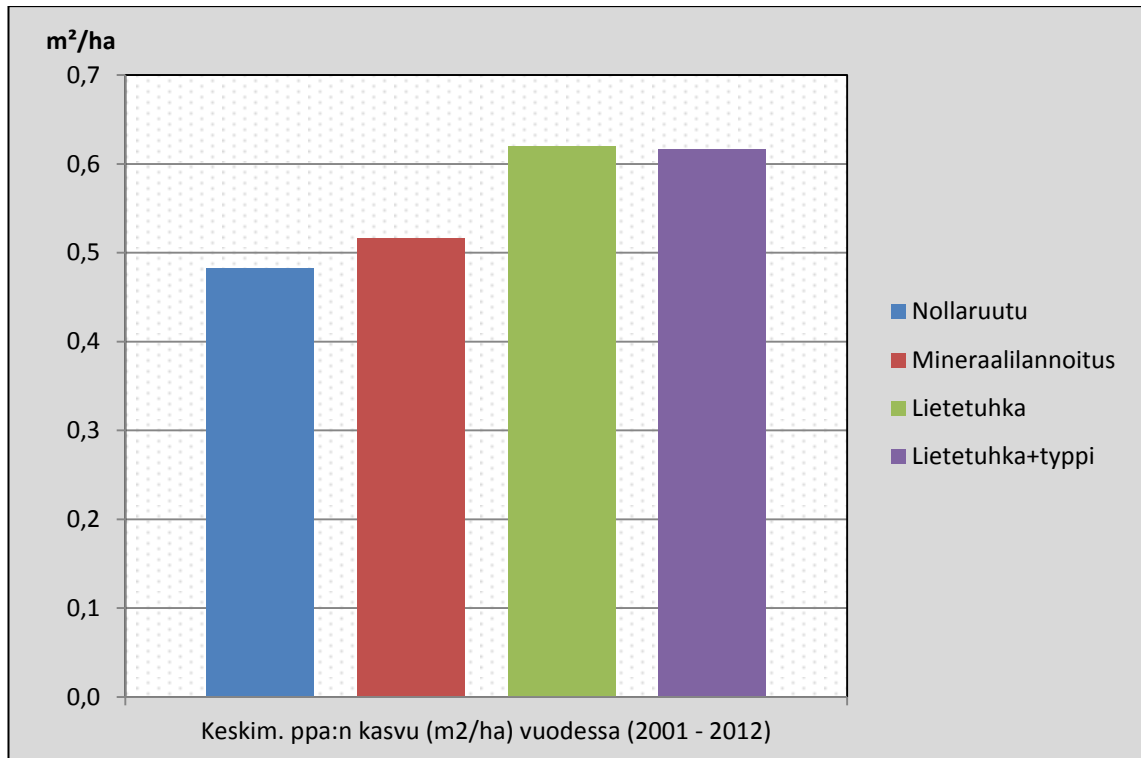
Kuvio 6. Puuston keskimääräinen rinnankorkeusläpimitan kasvu kivennäismaan kuusikossa 2001–2012.

5.3 Lannoituksen vaikutus pohjapinta-alaan

Turvemaan männikössä vuosina 2001–2006 puiden keskimääräisen pohjapinta-alan kasvu oli suurinta lietetuhkalla+typellä lannoitetuilla puilla. Verrattuna nollaruutuun, kasvua oli 36 %. Pelkällä lietetuhkalla ja väkilannoitteella päästiin arvoihin 27 ja 23 %. Nollaruudulla pohjapinta-alan vuotuinen kasvu oli $0,42 \text{ m}^2/\text{ha}$.

Jälkimmäisellä tutkimusjaksolla lietetuhkan antama lisäkasvu kasvoi hiukan ollen 29 %. Väkilannoitteena käytetty PK-lannoite ei enää kasvattanut pohjapinta-alaa yhtään verrattuna lannoittamattomiin ruutuihin. Lietetuhkan+typen antama lisäkasvu väheni ensimmäiseen jaksoon verrattuna ja se kasvatti puuston pohjapinta-alaa enää 22 %.

Arvioitaessa pohjapinta-alan kasvua koko 11 vuoden tutkimusjaksolla sekä lietetuhka, että lietetuhka+typpi antoivat vuotuisen 28 % lisäkasvun (n. $0,13 \text{ m}^2/\text{ha}$) verrattuna nollaruudun pohjapinta-alaan. Väkilannoitteen vaikutus jäi koko ajanjaksolla 7 % lisäkasvuun.

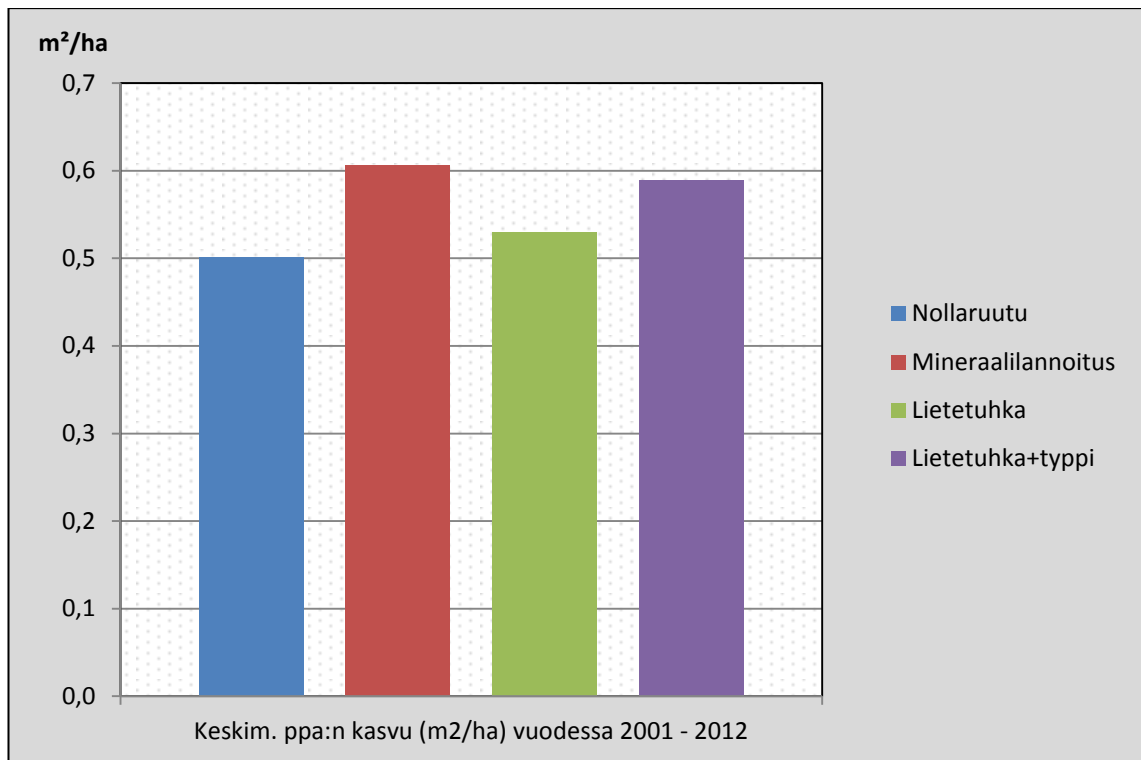


Kuvio 7. Keskimääräinen puuston pohjapinta-alan kasvu vuodessa turvekankaan männikössä 2001–2012.

Kivennäismaan männikössä vuosina 2001–2006 väkilannoite antoi 51 % pohjapinta-alan kasvun verrattuna nollaruudun tulokseen. Myös lietetuhkan+typen antama lisäkasvu oli merkittävä, 34 %. Pelkän lietetuhkan antama lisäkasvu jäi kuuteen prosenttiin. Nollaruudun pohjapinta-ala kasvoi tänä aikana keskimäärin 0,46 m²/ha/a.

Jälkimmäisellä tutkimusjaksolla kummankin lietetuhkalannoitteen antama pohjapinta-alan lisäkasvu oli noin kuusi prosenttia. Väkilannoite ei antanut enää lainkaan lisäkasvua.

Tarkkailtaessa pohjapinta-alan kasvua koko yhdentoista vuoden tutkimusjaksona, väkilannoitteen antama lisäkasvu oli hiukan yli 20 % (0,11 m²/ha/a) ja lietetuhkan+typen 17 %. Pelkkä lietetuhka kasvatti puiden pohjapinta-alaa 6 % verrattuna nollaruudun tulokseen.

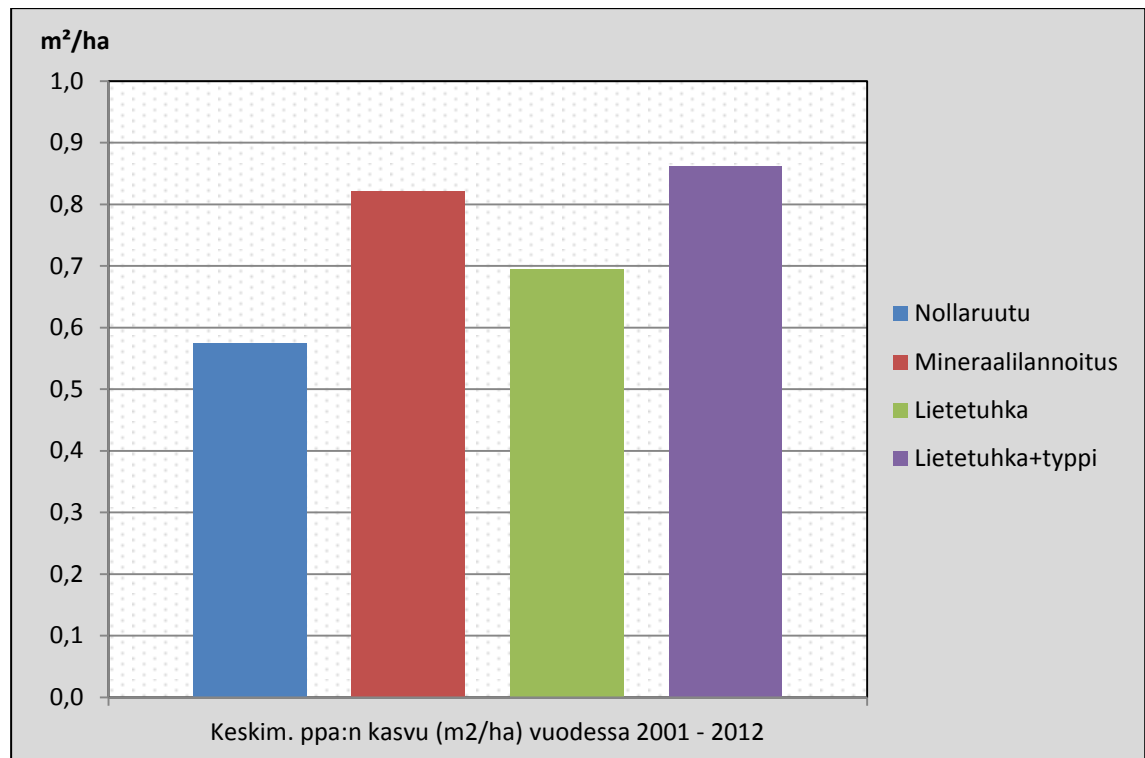


Kuvio 8. Keskimääräinen puuston pohjapinta-alan kasvu vuodessa kivennäismaan männikössä 2001–2012.

Kivennäismaan kuusikossa vuosina 2001–2006 nollaruudun pohjapinta-ala kasvoi vuodessa keskimäärin $0,55 \text{ m}^2/\text{ha}$. Sekä väkilannoite, että lietetuhka+typpi, antoivat tutkimuksen ensimmäisellä jaksolla noin 60 % lisäkasvun pohjapinta-alaan. Lietetuhkan antama lisäkasvu oli 26 %.

Ajanjaksolla 2006–2012 lietetuhka+typpi nousi parhaimmaksi antamallaan 44 % lisäkasvulla. Väkilannoitteena käytetyllä Metsän NP-lannoksella lannoitettujen puiden pohjapinta-alan kasvu putosi 31 prosenttiyksikköön ja pelkällä lietetuhkalla 18 prosenttiyksikköön verrattuna nollaruudun tulokseen.

Kuviosta 9 voidaan havaita, että koko tutkimuksen aikana paras pohjapinta-alan kasvu oli lietetuhka+typpi -koeruuduilla ($0,86 \text{ m}^2/\text{ha/a}$). Väkilannoitteella käsiteltujen puiden ppa:n lisäys oli 43 % ja pelkällä lietetuhkalla käsiteltujen 21 %.



Kuvio 9. Keskimääräinen puuston pohjapinta-alan kasvu vuodessa kivennäismaan kuusikossa 2001–2012.

5.4 Lannoituksen vaikutus puuston tilavuuskasvuun

Erityyppisillä lannoitteilla on erilaiset vaikutusmekanismit ja vaikutusajat. Perinteisesti on ajateltu väkilannoitteiden tehoavan nopeasti, kun taas tuhkalannoituksen vaikutus voi kestää kymmeniä vuosia.

Vaikka tämä tutkimus on kestänyt vasta yksitoista vuotta, siitä voitiin havaita edellä kuvattuja reaktioita. Ensimmäisen viiden vuoden aikana väkilannoite antoi kivennäismaalla suuren kasvun lisäyksen. Seuraavan kuuden vuoden aikana taas liete-
tuhkalannoitteilla lannoitettujen koeruutujen puut olivat kiihdyttäneet kasvuaan enemmän. Turvemailla tilanne on ollut erilainen, koska siellä ei ole ollut pulaa ty-
pestä, vaan kaliumista, fosforista ja hivenravinteista. Näitä on erityisesti tuhkalan-
noitteissa. Koealakohtaiset mittaus- ja kasvitulokset on esitetty liitteissä 7 ja 8.

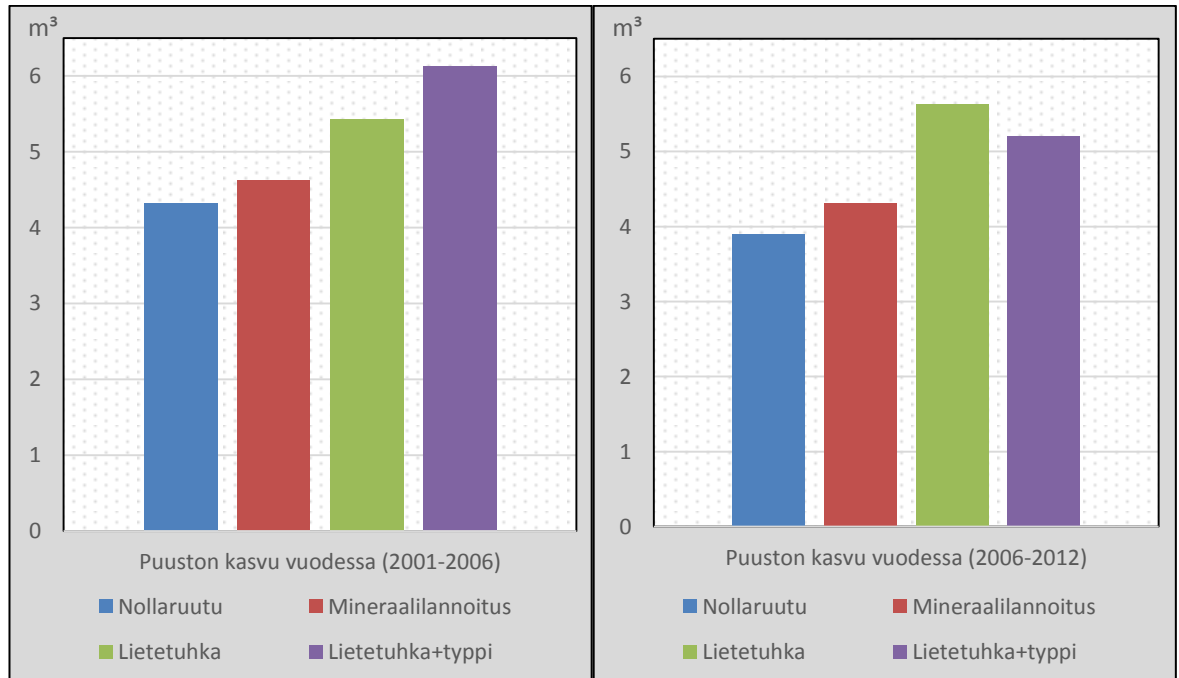
Koska tilavuuskasvun määrittäminen oli tutkimuksen keskeisimpiä tuloksia, sitä tarkasteltaessa on käytetty varianssianalyysiä ja Tukeyn testiä tilastollisten merkit-
tävyysarvojen arviontiin. 2001–2012 tilavuuskasvun pylväikköihin määriteltiin myös

virherajat. Varianssianalyysissä havaittiin, että lannoitteet lisäsivät jokaisella koealalla kasvua.

5.4.1 Männyn tilavuuskasvu turvemaalla

Ensimmäisen viiden vuoden aikana eniten puuston kasvuun vaikutti lisätyellä vahvistettu lietetuhka. Sen antama $1,79 \text{ m}^3/\text{ha/a}$ kasvunlisäys oli tilastollisesti melkein merkitsevä ($p=0,03$). Toiseksi eniten kasvuaan lisäsi pelkällä lietetuhkalla lannoitetut kuviot. PK-lannoitteen antama lisäkasvu oli pienin.

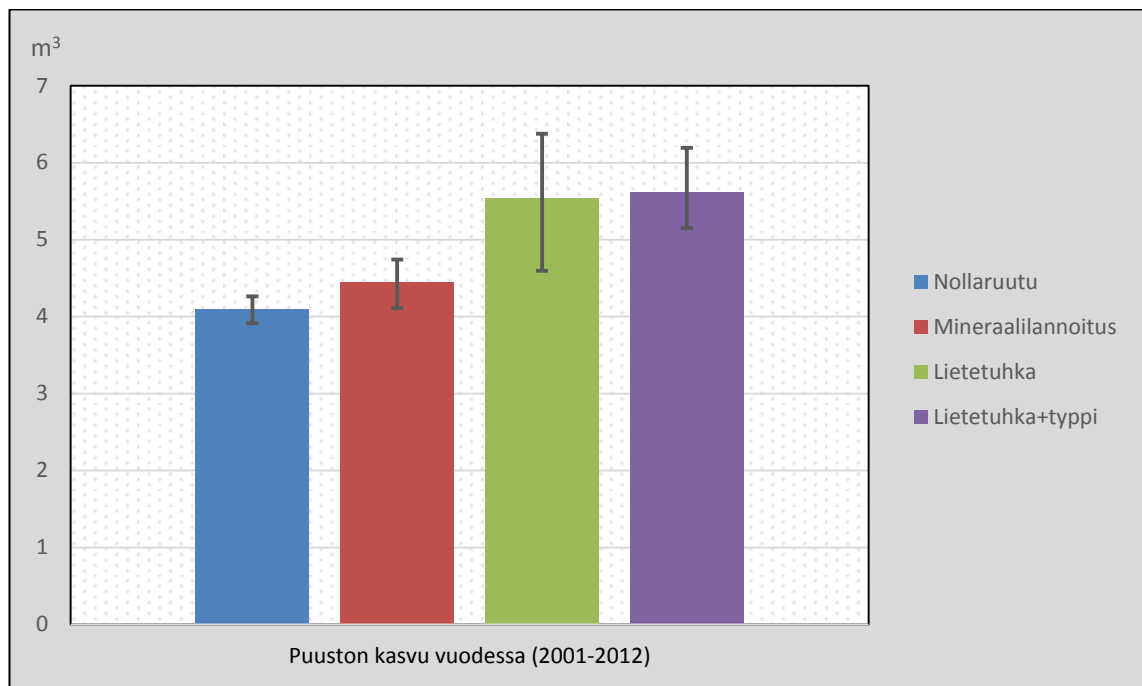
Seuraavan kuuden kasvukauden aikana väkilannoitteen antama lisäkasvu jäi edelleen pieneksi. Sen sijaan lietetuhkalannoitteiden antama kasvu erottui edukseen. Tällä ajanjaksolla pelkkä lietetuhka antoi enemmän kasvua ($1,73 \text{ m}^3/\text{ha/a}$) kuin lisätyellä vahvistettu lietetuhka. Pelkän lietetuhkan antama kasvunlisäys oli tilastollisesti lähes merkitsevä ($p=0,05$).



Kuvio 10. Puuston keskimääräinen tilavuuden kasvu (m^3) vuodessa turvekankaan männikössä 2001–2006 ja 2006–2012.

Koko yhdentoista vuoden seurantaajaksolla lannoittamattomien ruutujen vuotuinen keskikasvu oli $4,1 \text{ m}^3/\text{ha/a}$. Muiden lannoitteiden aikaansaamaa kasvua verrattiin

tähän nollaruudun puuston kasvuun. Parhaana lannoitteena lisätypellä vahvistettu lietetuhka antoi $5,6 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{a}$ kasvun ($p=0,04$). Verrattuna lannoittamattomiin koealoihin sen kumulatiivinen lisäkasvu koko seurantajaksolla oli siis $16,8 \text{ m}^3/\text{ha}$. Pelkkä lietetuhka antoi lähes saman kasvun ($p=0,05$). Tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan. Mineraalilannoituksen antamaa lisäkasvua ei voinut pitää tilastollisesti merkitseväenä ($p=0,86$).

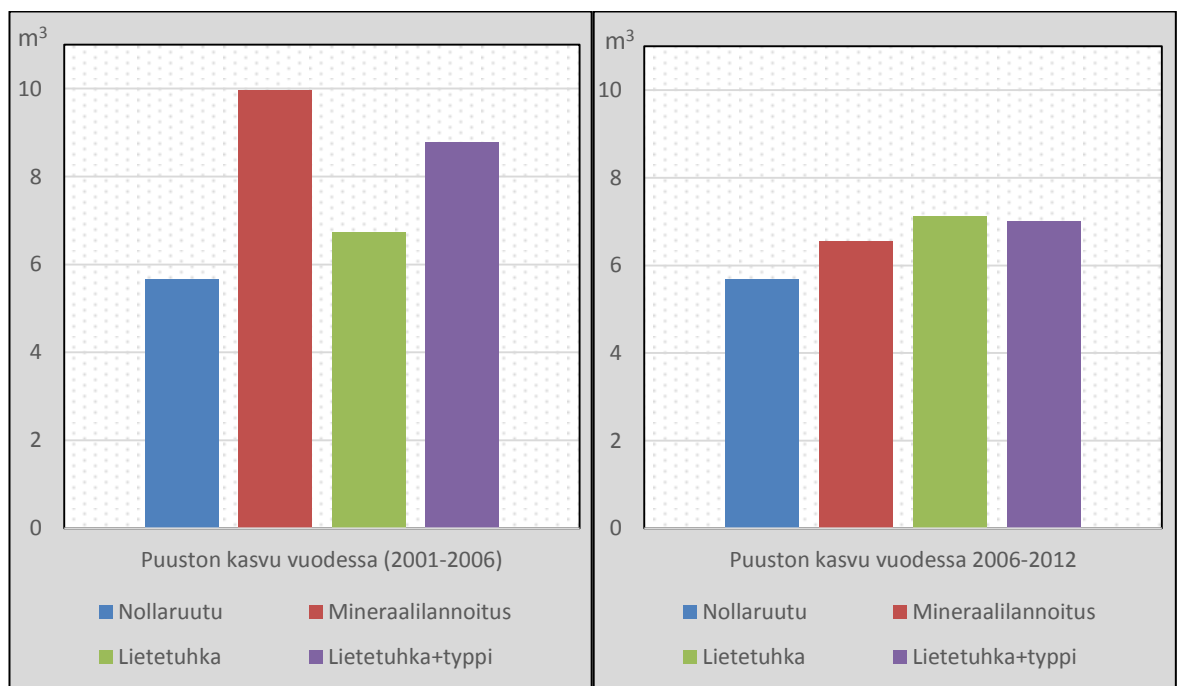


Kuvio 11. Puuston keskimääräinen tilavuuden kasvu (m^3) vuodessa turvekankaan männikössä 2001–2012.

5.4.2 Männyn tilavuuskasvu kivennäismaalla

Kivennäismaan männikössä tilanne ensimmäisen viiden vuoden aikana oli hyvin toisenlainen verrattuna turvemaiden tuloksiin. Mineraalilannoite antoi 2001–2006 männikössä parhaan lisäkasvun, $4,3 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{a}$ ($p=0,02$). Myös lietetuhkalla+typellä lannoitetut koealat erottuivat selkeästi lannoittamattomista aloista. Ero ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevä ($p=0,08$). Tämä kuvaa, miten tärkeä merkitys typen määrällä on metsän kasvuille kivennäismaalla, tässä tapauksessa mustikka-tyyppin kankaalla. Typpi lannoitteena antaa suurimman kasvun heti levittämisen jälkeisinä vuosina. Kuvion 12 pylväskaaviosta ilmiön havaitsee selvästi.

Seuraavan kuuden vuoden aikana lietetuhkalannoitteet olivat jo kirineet kasvussa mineraalilannoitteen ohi. Väkilannoitteen antama kasvunlisäys oli yllättävän matala toisen seurantakauden aikana. Vuotuinen kasvu väkilannoitetulla alalla oli vain 0,9 m³ suurempi kuin lannoittamattomalla seuranta-alalla. Lietetuhkan monipuoliset ravinteet antoivat pidempiaikaisen kasvunparannuksen kivennäismaan männikölle.

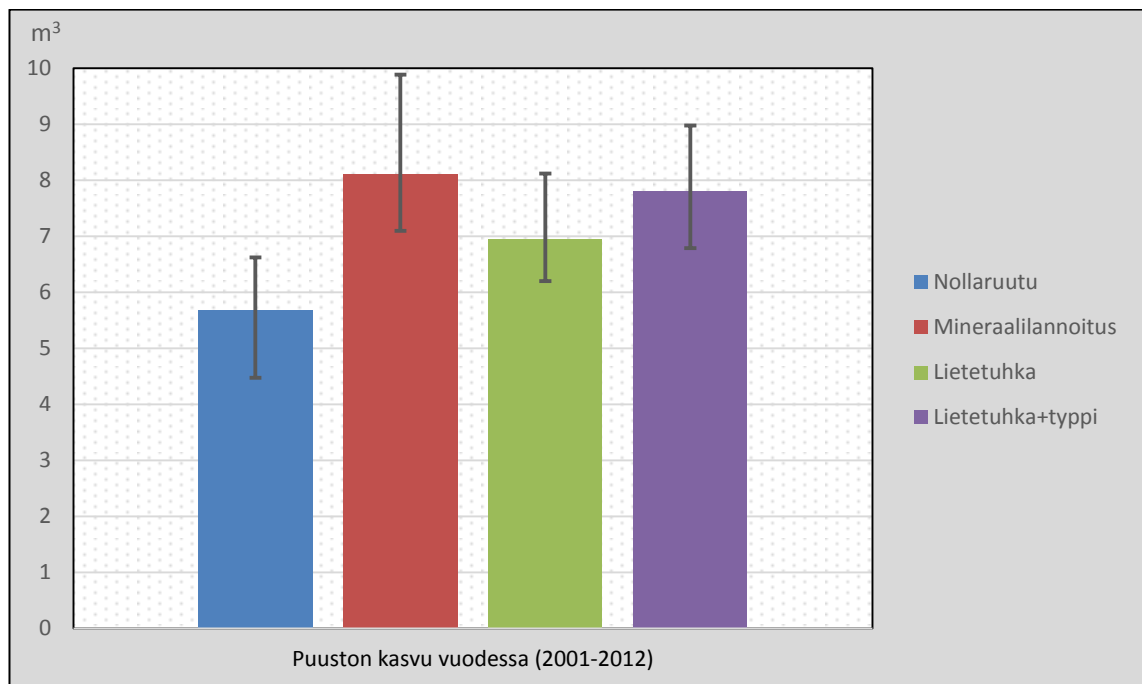


Kuvio 12. Puuston keskimääräinen tilavuuden kasvu (m³) vuodessa kivennäismaan männikössä 2001–2006 ja 2006–2012.

Tarkasteltaessa kivennäismaan männikön kasvua koko yhdentoista vuoden seurannan ajalta, voitiin havaita väkilannoitteena käytetyn Suomensalpietarin ja typellä vahvistetun lietetuhkalannoitteen antaneen lähes yhtä suuren kasvun. Tilastollista merkitsevyyttä näiden kasvuille ei saatu ($p=0,14$ ja $p=0,22$). Pelkän lietetuhkan antama vuotuinen lisäkasvu jäi näistä kuution verran pienemmäksi.

Lannoittamaton puusto kasvoi yhdentoista vuoden aikana 62,5 m³/ha. Parhaimman kasvun antanut väkilannoite lisäsi tätä kasvua 26,7 m³/ha. Puuston ollessa jo melko järeätä, voidaan kasvun olettaa kohdistuvan nimenomaan tukkipuun osuuteen. Koska mineraalilannoitteella lannoitetut puut keskittynevät lähivuosina juuris-

ton kasvattamiseen, nousee lietetuhka+typpi lähivuosina myös kivennäismaan männikössä parhaimman kasvun antavaksi lannoitteeksi.

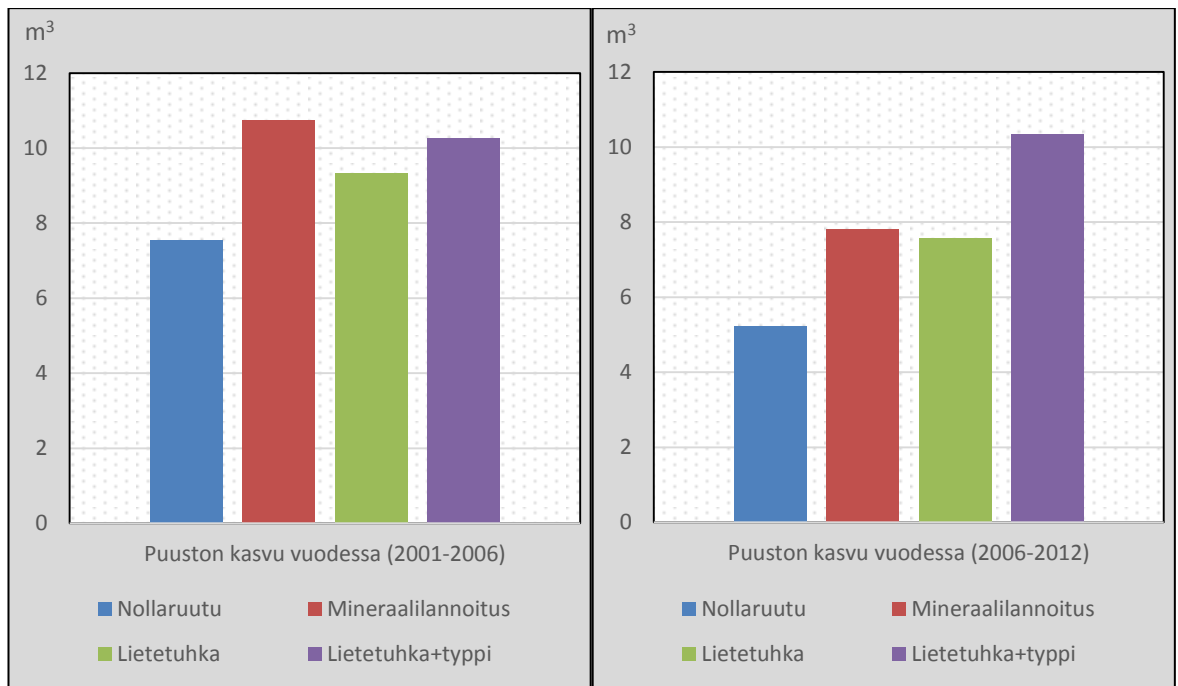


Kuvio 13. Puuston keskimääräinen tilavuuden kasvu (m³) vuodessa kivennäismaan männikössä 2001–2012.

5.4.3 Kuusen tilavuuskasvu kivennäismaalla

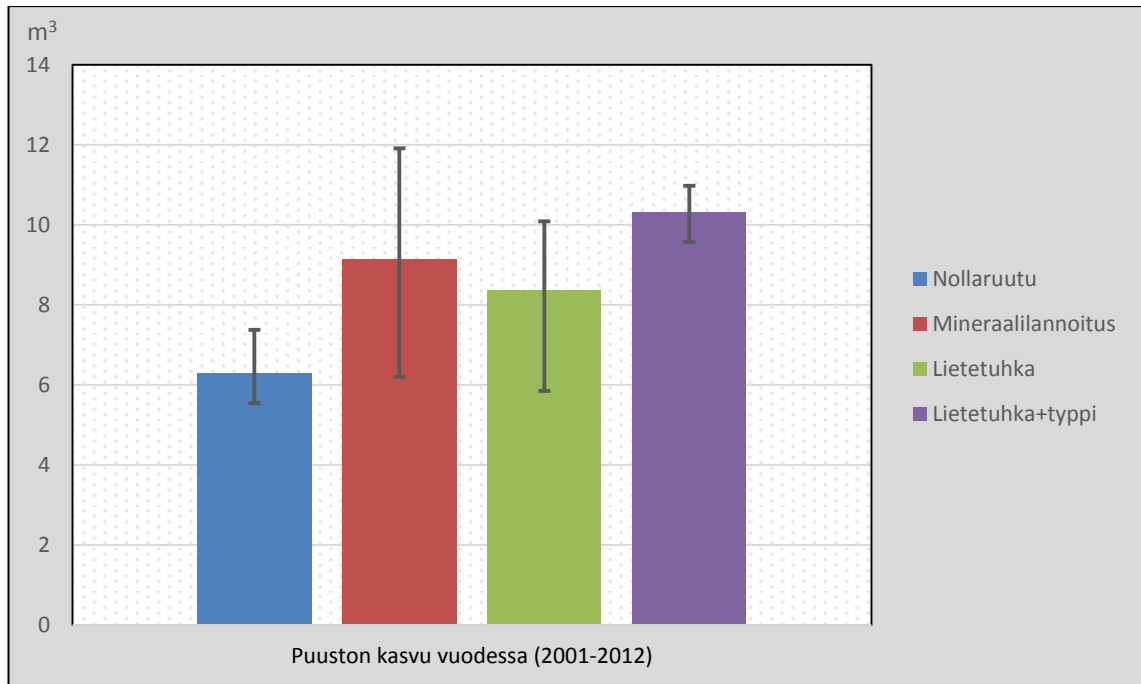
Kivennäismaan kuusikossa kaikkien eri lannoitteiden antamat kasvutulokset olivat melko samanlaiset ensimmäisen viiden vuoden aikajaksolla. Väkilannoite antoi eniten kasvua verrattuna nollakoealaan (2,71 m³/ha/a), mutta lietetuhka+typpi pysyi lähes samaan. Tästä jäi hiukan jälkeen pelkkä lietetuhka.

Seuraavan kuuden vuoden aikana, 2006–2012, lietetuhka+typpi antoi edelleen lähes saman kasvutuloksen ($p=0,06$). Väkilannoitteen teho näytti pienentyneen selvästi. Kuitenkin sen tulos ylitti 0,3 kuutiometrillä vuodessa lietetuhkan antaman kasvuvaiikutuksen.



Kuvio 14. Puuston keskimääräinen tilavuuden kasvu (m^3) vuodessa kivennäis- maan kuusikossa 2001–2006 ja 2006–2012.

Koko seurantajaksolla, 2001–2012, lisätypellä vahvistettu lietetuhka oli parhaan kasvun antava lannoite. Sillä käsitellyillä koealoilla puuston vuotuinen kasvu oli $10,3 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{a}$ ($p=0,12$). Lannoittamattomien koealojen kasvun keskiarvo oli $4,0 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{a}$ pienempi. Kumulatiivisessa kasvussa ero oli 11 vuoden aikana siis $44,1 \text{ m}^3/\text{ha}$. Toiseksi parhaaksi lannoitteeksi osoittautui mineraalilannoitus. Sen- kään antamaa vuotuista $9,2$ kuution vuotuista kasvua ei voinut pitää tilastollisesti merkitsevänä ($p=0,33$). Sama asia koski lietetuhkalla lannoitettuja koealoja ($p=0,57$). Sekä NP-lannoitteella, että lietetuhkalla käsitellyillä koealoilla puiden kasvunvaihtelu oli suurta kuten aiemmassakin tutkimuksessa, mutta mitään yksi- selitteistä syytä vaihteluun on vaikea sanoa.



Kuvio 15. Puuston keskimääräinen tilavuuden kasvu (m³) vuodessa kivennäismaan kuusikossa 2001–2012.

5.5 Lannoituksen vaikutus neulasten ravinteisiin

Lannoituksen vaikutusta neulasten ravinnepitoisuuksiin seurattiin edellisen tutkimuksen tavoin turvemaan männikön koeruuduilla.

Havupuiden neulasten ravinnepitoisuudet kertovat, millainen on tutkitun puun sen hetkinen kasvupotentiaali ja ravinnetila. Metsää lannoitettaessa ravinteiden lisäys ei aina näy heti neulaston ravinteiden lisääntymisenä. Syynä asiaan on niin sanottu ohentumisilmiö. Varsinkin fosforia ja kaliumia sisältäviä lannoitteita käytettäessä neulasten määrä, koko ja näin ollen puuston biomassa lisääntyy. Tietty ravinemäärä vaikkapa liukoisen typen osalta jakaantuu suuremmalle alalle ja sen pitoisuus laskee. (Huotari 2012, 23.)

Ohentumisilmiö tuli esiin selkeästi tuloksissa. Tarkasteltaessa edellisen tutkimuksen mittaustuloksia huomataan monien ravinteiden pitoisuuksien laskeneen alkuperäisestä tilanteesta lannoituksesta huolimatta. Nyt näkyvissä oli sen sijaan pitoisuuksien nousu, joka jatkunee alkuperäistä tilannetta paremmaksi. Ilmiö näkyi niin typen, kalsiumin, kuin magnesiuminkin kohdalla.

Neulasten sisältämiin ravinnepitoisuuksiin on merkityksensä myös sääoloilla. Joidenkin ravinteiden pitoisuudet voivat kasvaa, jos neulaset jäävät pieniksi esimerkiksi kuivan alkukesän vuoksi. Eräässä Metlan tutkimuksessa puiden neulasten maksimimassa on ollut jopa kaksinkertainen minimimassaan verrattuna kaksitoista vuotta kestäneen tutkimuksen aikana, joten vaihtelua tapahtuu (Moilanen & Hytönen 2014, 15).

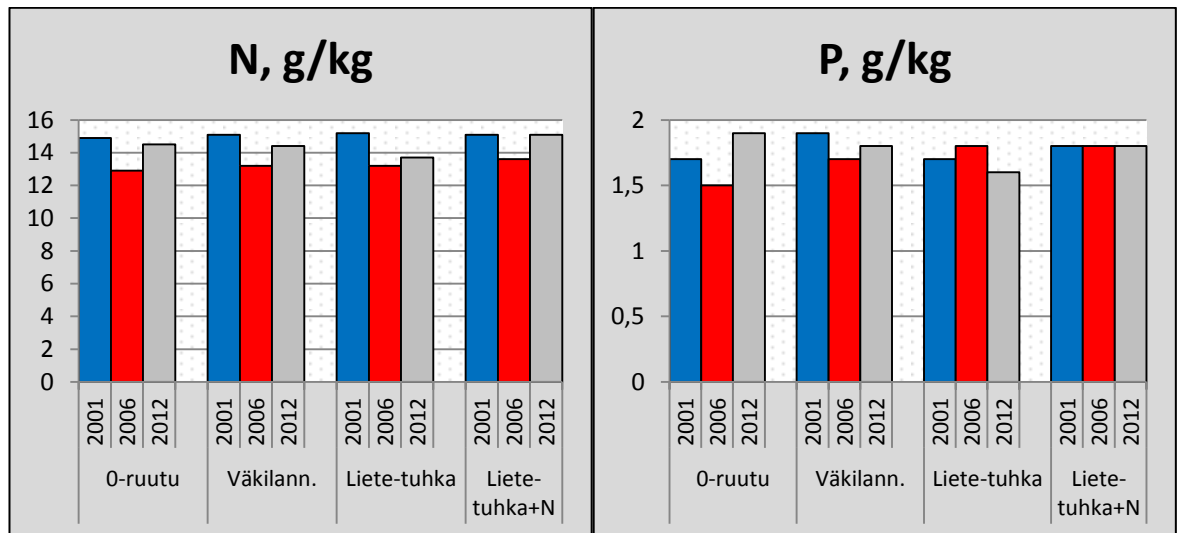
5.5.1 Typpi ja fosfori

Turvemaalla kaikkien koejäsenten neulasten typpipitoisuus nousi edellisestä mittauksesta. Typpipitoisuus oli kaikilla ruuduilla yli Paarlahauden ym. määrittelemän 13 g/kg puutosrajan (1971, 40). Tämä on luonnollista, koska typen määrä ei ole yleensä minimitekijä turvemaiden metsissä. Vähäisintä typpimäärän nousu oli pelkällä lietetuhkalla lannoitetuilla ruuduilla. Merkillepantavaa oli, että myös lannoittamattomilla ruuduilla havaittiin typpitason nousua verrattuna edelliseen mittaukseen. Moilasen (2005, 144) mukaan lannoituksesta aiheutunut neulasten typpimäärän kasvu pitäisi jäädä muutaman vuoden mittaiseksi. Tämän tutkimuksen aikana typpimäärä on todennäköisesti ensin noussut, sitten ohentumisilmiö on laskenut typen määrää 2006 vuoden tasolle ja nyt on palattu suunnilleen alkupe räiseen tasoon.

Fosfori on usein minimitekijä turvemaiden ravinteissa. Fosforin määrä nousi lannoittamattomienkin koealojen neulasissa edellisten tutkimusten arvoista. Syytä tähän on vaikea arvioida. Lannoitetuilla koealoilla fosforin määrässä ei tapahtunut suuria muutoksia. Kuitenkin lietetuhkalla lannoitetuilla koealoilla neulasten fosforipitoisuus laski arvoon 1,6 g/kg. Raja-arvona lievälle fosforinpuutokselle pidetään 1,4 g/kg (Paarlahti ym. 1971, 40).

Lietetuhkan sisältämä fosfori ei näytä tutkimuksen mukaan kohottaneen fosforin määrää neulasissa edellisen seurantatutkimuksen tasosta. Lannoitteissa käytettävä fosfori on hidasliukoista, mutta levitetyn fosforin tulisi näkyä jo 3–5 vuoden kuluessa levityksestä myös neulasten ravinnepitoisuuksissa. Lietetuhkalla lannoitetuilla turvemaan koealoilla 0–20 cm syvyydessä havaitut suuret alumiinin ja raudan määrät pidättävät mahdollisesti fosforia niin, että puut eivät saa sitä nopeasti käyt-

töönsä. Pidemmällä aikajänteellä selviää, miten fosforin määrä kehittyy. Fosforin on tutkittu näkyvän puuston ravinnetilassa jopa 25–30 vuoden ajan (Moilanen 2005, 144).



Kuvio 16. Typen ja fosforin määrät turvemaan männikön neulasissa.

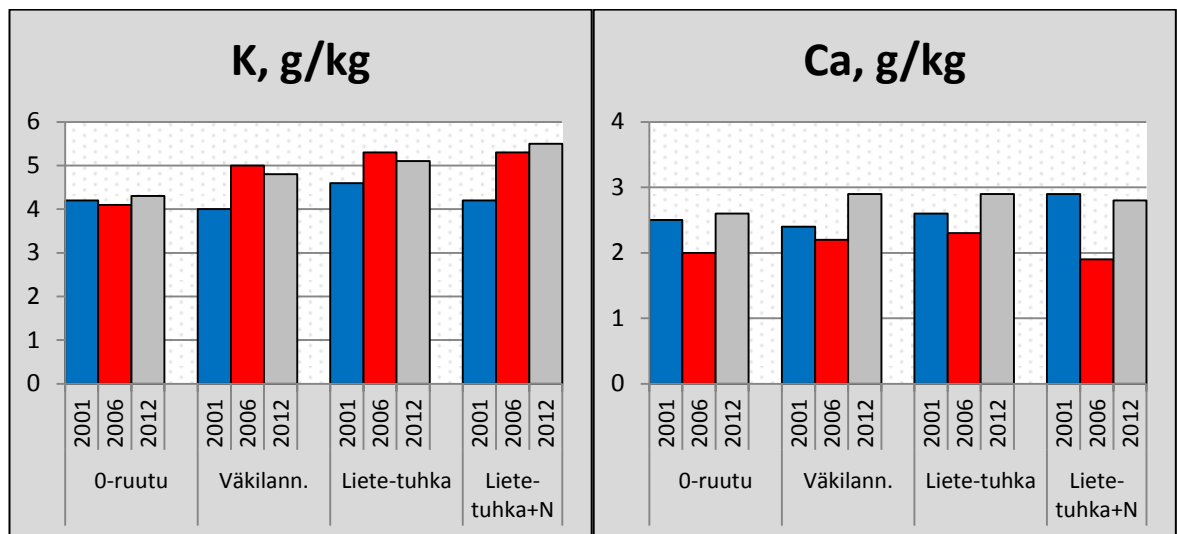
5.5.2 Kalium ja kalsium

Kaliumin määrä pysyi melko vakaasti samalla tasolla kuin edellisessä tutkimuksessa. Muutokset olivat niin vähäisiä, että ne voidaan jättää huomiotta. Kaliumin puutteesta ei mikään lannoitettu koeala enää kärsi. Tutkimuksen alussa kaliumin määrä oli niukka. Kaliumin pitoisuuden lievän puutoksen rajana voidaan pitää arvoa 4,0 g/kg (Paarlahti ym 1970, 40).

Kaliumpitoisuuden tulisi neulasissa nousta sitä enemmän, mitä enemmän lannoite on sisältänyt kaliumia (Moilanen 2005, 145). Kovin isoja eroja kalium-määrissä ei ollut eri lannoitteiden välillä, mutta eniten kaliumia sisältänyt PK-lannoite ei kuitenkaan kasvattanut neulasten kaliumpitoisuutta korkeimmalle. PK-lannoitteessa kalium on vesiliukoisena kaliumkloridina.

Edellisessä tutkimuksessa havaittiin kalsiumpitoisuuden laskeneen kaikilla turvekankaan koealoilla. Jukan (1988, 157–158) mukaan selvänä puutoksena pidetään arvoa 2,5 g/kg. Nyt havaittiin kalsiumin määrän nousseen jokaisella turvemaan

koealalla tämän rajan yläpuolelle. Kaikkein suurin nousu (0,9 g/kg) oli lietetuhkal-la+typellä lannoitetuilla koealoilla.

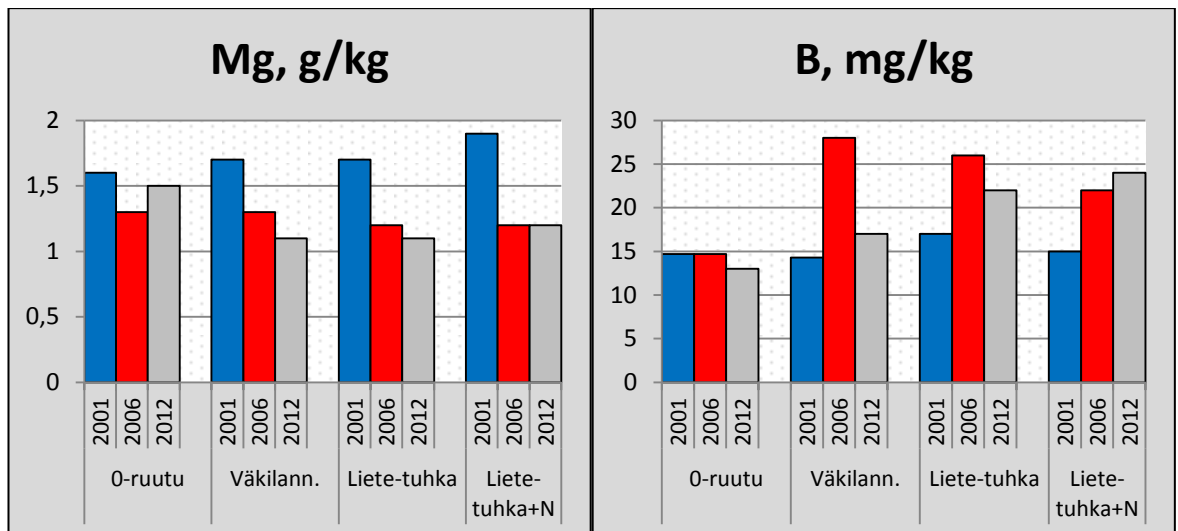


Kuvio 17. Kaliumin ja kalsiumin määrät turvemaan männikön neulasissa.

5.5.3 Magnesium ja boori

Fosforin ja kaliumin lannoitekäyttö alentaa myös hivenravinteiden pitoisuuksia ohentumisilmiön kautta. Magnesiumin määrä vähentyi väkilannoitteella ja lietetuhkalla käsitellyillä koealoilla. Lannoittamattomillakin koeruuduilla sen määrä lisääntyi edellisestä tutkimuksesta. Biolietteen sisältämä pieni magnesiummäärä ei näkynyt tutkimuksessa neulasten magnesiumin määrää nostavana.

Kaikki lannoitteet nostivat selkeästi männyn neulasten booripitoisuuksia ensimmäisen viisivuotiskauden aikana. Samanlaista käyttäytymistä on havaittu muissakin tutkimuksissa (Isomaa 2010, 48). Jälkimmäisellä tutkimusjaksolla väkilannoitteella käsitellyillä puilla booriarvo on palautunut lähes alkuperäiseen tasoon. Lietetuhkilla lannoitetuilla koealoilla neulasten booripitoisuus on yhä reilusti alkuperäisiä arvoja korkeammalla. Boorin optimiarvoksi on määritelty männylle 10–30 mg/kg (Moilanen ym. 2005, 89). Varsinkin lietetuhkalannoitteilla käsitellyillä aloilla tuohon tavoitteeseen on ylletty hyvin.



Kuvio 17. Magnesiumin ja boorin määrät turvemaan männikön neulasissa.

5.5.4 Typen suhde kaliumiin ja fosforiin

Puiden ravinnetaloudessa on tärkeää myös eri ravinteiden määrien suhde toisiinsa. Onkin määritelty sopivia suhteita eri ravinteiden välille, jotta puut voivat parhaiten hyödyntää ravinteita. Moilasen ja Hytösen (2014, 12) mukaan männyn neulasissa typen ja kaliumin suhde tulisi olla noin 100:30–35 ja typen ja fosforin välinen suhde 100:10.

Taulukko 4. Typen suhde kaliumiin ja fosforiin turvemaan männikön neulasissa.

	Nollaruutu	Väkilannoitus	Lietetuhka	Lietetuhka+typpi	Ohjearvo
N:K	3,4	3,0	2,7	2,7	2,9–3,3
N:P	7,6	8,0	8,6	8,4	10,0

Edellisestä tutkimuksesta on tapahtunut lietetuhkalannoitteilla käsiteltyjen puiden neulasissa sekä typpi/kalium- että typpi/fosfori -suhteissa muutos suurempaan suuntaan (Taulukko 4). Lietetuhkalannoitteen aiemmat arvot (N:K ja N:P) olivat 2,5 ja 7,3. Lietetuhka+typpi -lannoitetuilla ruuduilla aiemmat arvot olivat 2,6 ja 7,6. Sama on tapahtunut väkilannoitteenkin kohdalla (aiemmat arvot 2,6 ja 7,8). Nollaruudussa muutos on tapahtunut toiseen suuntaan.

Tuloksista voidaan havaita, että ainoastaan nollaruudun neulasissa on pientä puutetta kaliumista. Lannoitetuilla koealoilla sekä fosforin että kaliumin määrä on riittä-

vä. Typen määrä vaihteli muilla koealoilla 14 g/kg tietämällä, mutta typellä vahvistetulla lietetuhkalla käsitellyllä koealalla typen määrä oli noin 15 g/kg.

5.6 Lannoituksen vaikutus maaperään

Kun metsää lannoitetaan, puut käyttävät heti vain pienen osan levitetyistä ravinteista. Maanparannusvaikutus on pidempi prosessi. Esimerkiksi nuoren rämemännikön on tutkittu hyödyntäneen viiden lannoitusta seuranneen vuoden aikana 20 % kaliumista ja 10 % muista annetuista ravinteista (Moilanen 2005, 146). Lisättyjä ravinteita varastoituu mm. metsämaan karikkeeseen, humukseen ja pintakasvillisuuteen. Erilaiset bakteerit ja sienet hajottavat niihin sitoutunutta orgaanista ainesta puiden hyödynnettäviksi. Osa ravinteista, esimerkiksi iso osa kaliumista huuhtoutuu syvemmälle maahan.

Puuston kasvukyky turvemailla määräytyy lähinnä typen, fosforin ja kaliumin saatavuuden mukaan. Myös maaperän happamuudella on oma vaikutuksensa muun muassa ravinteiden hajoamisprosessien tehokkuuteen. Erityisesti turvemailla puuston tarpeita tyydyttävät keskeisinä pintaturpeen sisältämät ravinteet. Pintaturve sisältää runsaasti typpeä ja aiheuttaa näin selvän eron turve- ja kangasmaiden välille.

On hyvä ottaa huomioon, että sääoloilla ja vuodenaikaisvaihteluilla on oma vaikutuksensa ainakin typen ja fosforin määriin maaperässä. Lietetuhkalla+typellä lannoitettujen koeruutujen maaperän happamuutta ja ravinteiden määrää seurattiin edellisen tutkimuksen tavoin.

5.6.1 Maaperän happamuus turvemailla

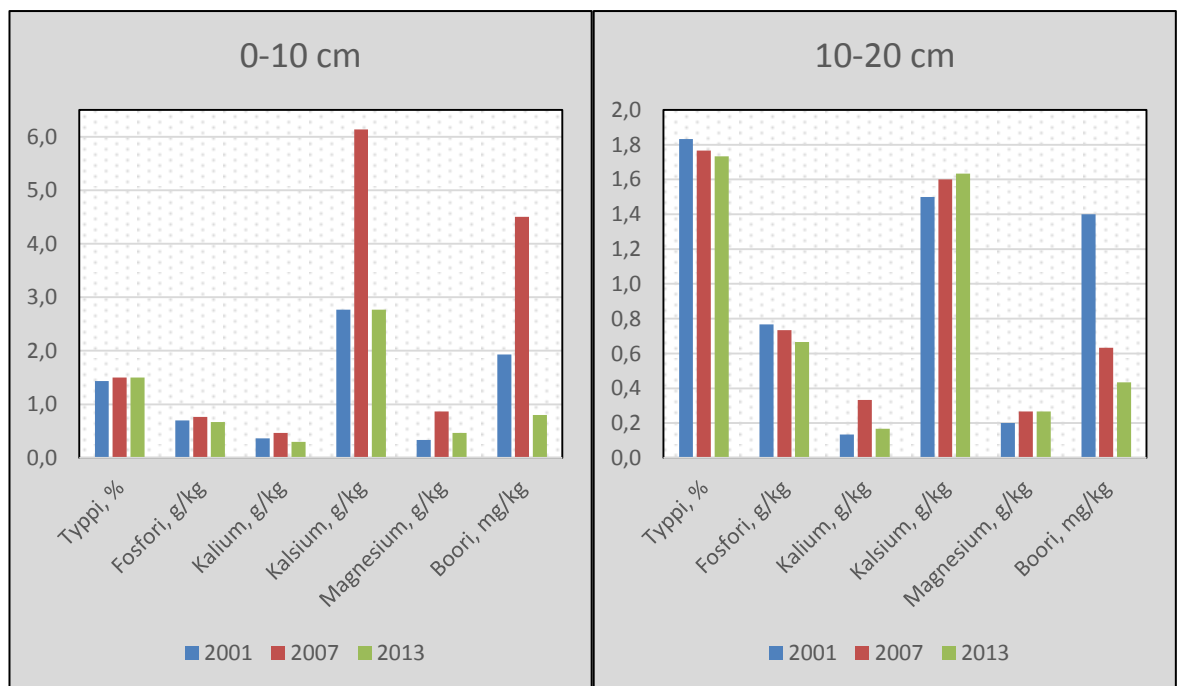
Maaperän happamuutta tutkittiin lietetuhkalla+typellä lannoitetuilla turvemaan koeruuduilla. Emäksisenä tuhkan tulisi vähentää maaperän happamuutta. Tutkimusten mukaan sen tulisi nostaa pintaturpeen pH:ta 1–3 yksikköä pitkäaikaisesti (Moilanen & Issakainen 2003, 24).

Happamuus pysytteli 10–20 cm syvyydessä ennallaan (LIITE 3). 0–10 cm syvyydellä happamuus oli kokeiden alussa 3,5. Vuonna 2007 otetuissa näytteissä se oli noussut neljään ja nyt laskenut taas arvoon 3,6.

Suuria muutoksia happamuudessa ei siis voitu havaita. Tätä voitiin pitää yllätyksenä. Ehkä yksi syy on siinä, että osa käytetystä tuhkasta oli lähtöisin turpeen poltosta. Turvetuhkan kalkitusvaikutus ei ole puutuhkan veroista (Moilanen 2005, 139). Frizen ja Perkiönmäen (1999, 6) mukaan Suomessa luontainen metsämaan happamuus pH-asteikolla on noin 4.

5.6.2 Maaperän ravinteet turvemaalla

Kuviosta 18 voidaan havaita, että 0–10 cm syvyydellä typen määrä on lisääntynyt aavistuksen. Muiden tutkittujen ravinteiden määrät ovat laskeneet verrattuna edelliseen mittaukseen. Puut ovat ottaneet lannoituksesta saatuja ravinteita käyttöönsä. Erityisesti kalsiumin ja boorin määrät ovat laskeneet runsaasti.



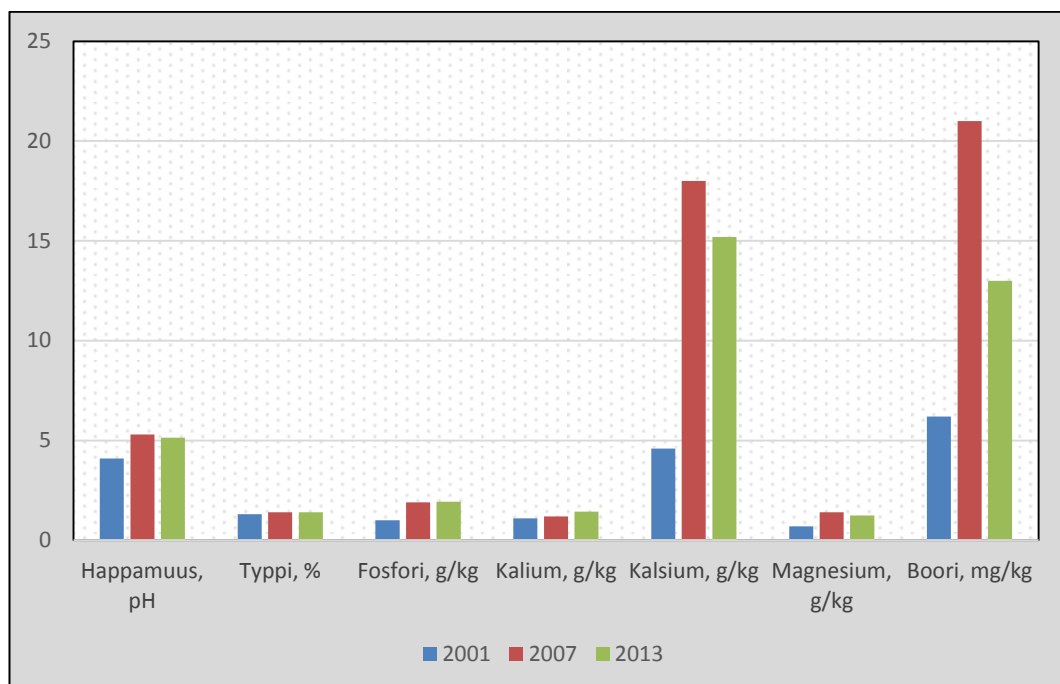
Kuvio 18. Lietetuhkalla+typellä lannoitetun turvemaan männikön ravinteet (0–10 cm ja 10–20 cm syvyyksillä).

Myös 10–20 cm syvyydellä useimpien ravinteiden määrät olivat vähentyneet verrattuna edelliseen tutkimusajankohtaan. Kalium pidättyy tunnetusti turpeeseen

heikosti. Se liukenee melko nopeasti juurien ulottumattomiin (Lipponen 1991, 65). Ainoastaan kalsiumin määrä oli lisääntynyt. Magnesiumin määrä on pysynyt samana. Muissakin tutkimuksissa on havaittu, että suuremmat ravinteisuusmuutokset tuhalla lannoitetuissa metsissä rajoittuvat 10 cm pintakerrokseen (Moilanen & Issakainen 2003, 73).

Kummassakin tutkitussa syvyydessä raudan ja alumiinin määrät ovat lisääntyneet monikymmenkertaisiksi. Syytä tähän on vaikea sanoa. Trendi oli näkyvissä jo edellisessä tutkimuksessa. Aineet eivät ole lannoitevalmisteiden haitallisten aineiden listalla (MMM asetus 12/2007). Todennäköisesti nämä metallit ovat lähtöisin käytetystä tuhasta. Alumiinin ja raudan voidaan olettaa sitovan maaperän fosforia, joten niiden pitoisuuksien nousu ei ole pelkästään negatiivista.

5.6.3 Maaperän ravinteet kivennäismaan männikössä

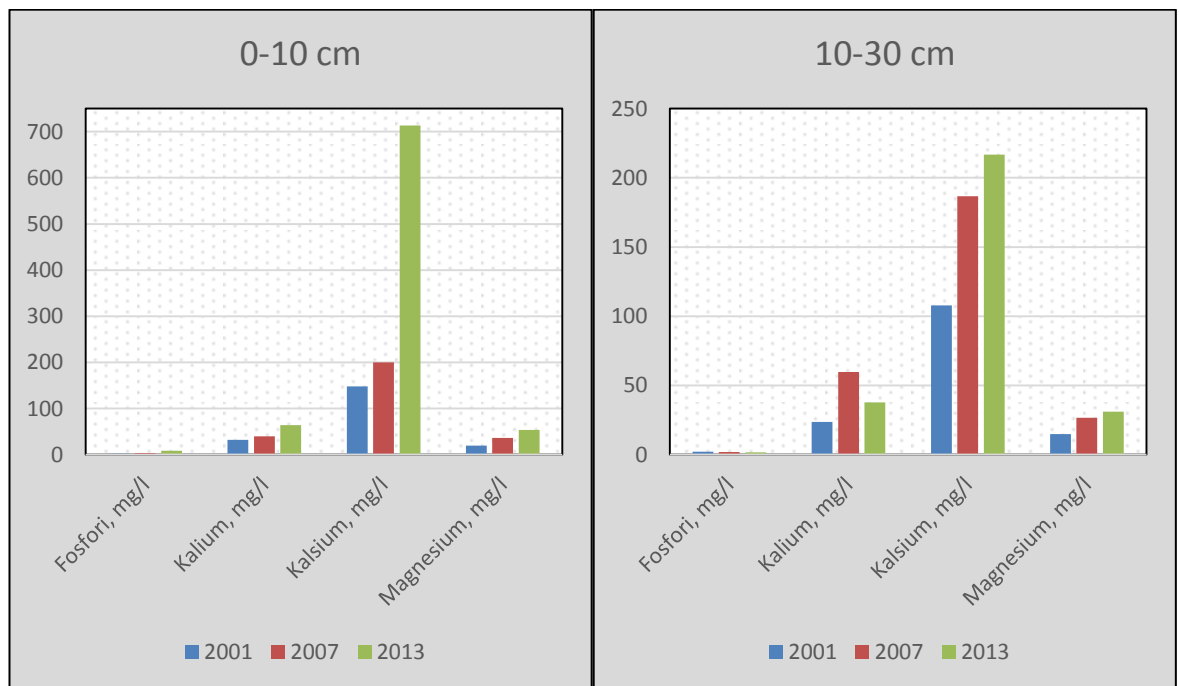


Kuvio 19. Lietetuhkalla+typellä lannoitetun kivennäismaan männikön ravinteet (humuskerros).

Lannoitus on nostanut kivennäismaan männikössä humuksen pH:ta. Voimakaimmin kohonneet kalsiumin ja boorin arvot ovat laskusuunnassa verrattuna edelliseen tutkimukseen.

Helmisaaren ym. (2008, 19) mukaan kivennäismailla tärkeimpiä ravinnetunnuksia kasvupaikan tuotoskyvyn kuvaamiseksi ovat metsämaan pintaosan kokonaistypen pitoisuudet sekä kalsiumin ja magnesiumin määrät kivennäismaassa. Kalsium ja magnesium vaikuttavat maan happamuuteen ja näin edistävät humuksen hajoamista.

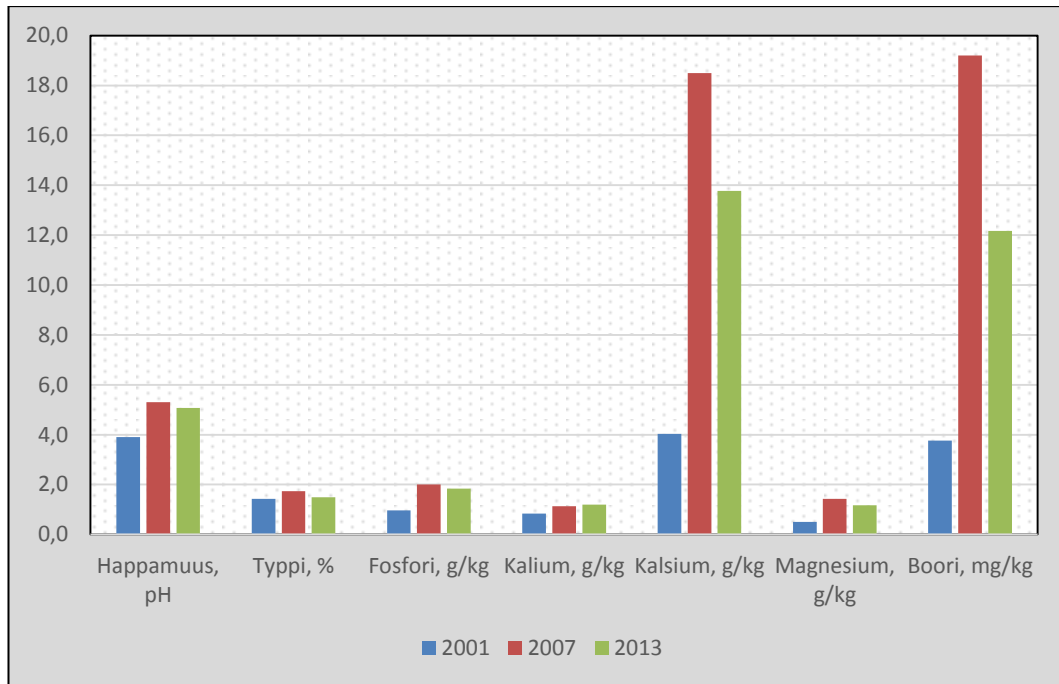
Kuvioista 20 voidaan havaita, että erityisesti kivennäismaan männikön 0–10 ja 0–30 cm kerroksissa kalsiumin määrä on edelleen nousussa.



Kuvio 20. Lietetuhkalla+typellä lannoitetun kivennäismaan männikön ravinteet (0–10 cm ja 10–30 cm syvyyksillä).

5.6.4 Maaperän ravinteet kivennäismaan kuusikossa

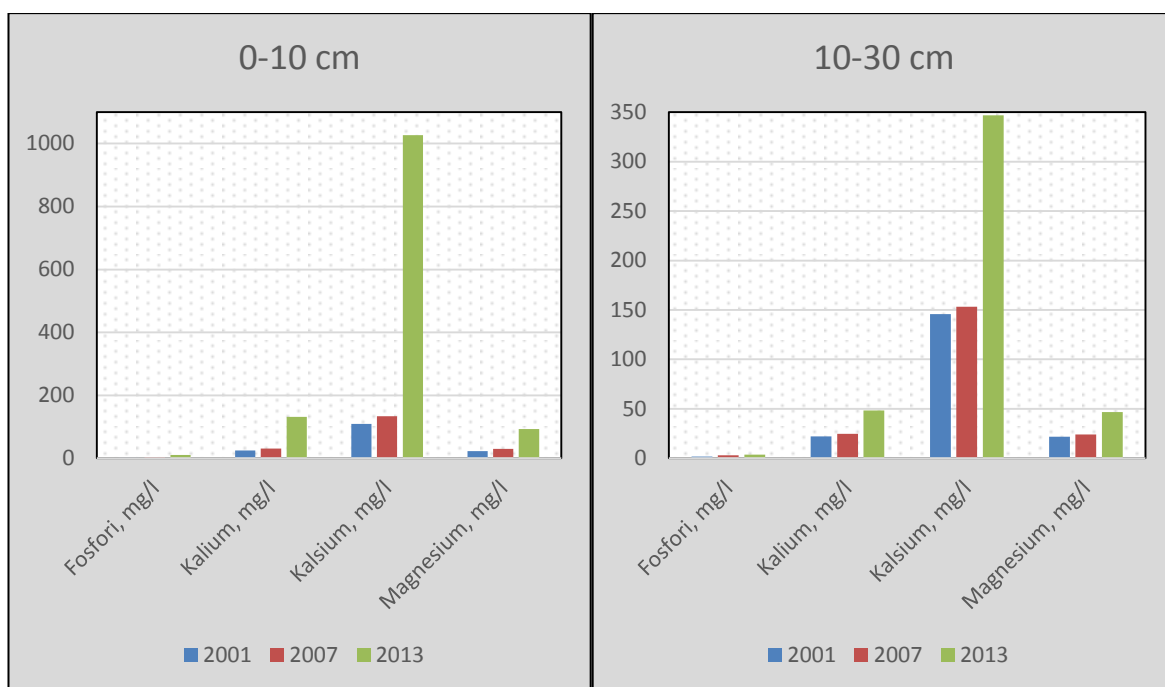
Lietetuhkalla+typellä lannoitettujen kuusikon koealojen humuskerroksen ravinnetilanne on hyvin samanlainen kuin männikössäkin. Lannoituksen tuloksena kaikkien analysoitujen ravinteiden määrä ja humuksen happamuus ovat ensin nousseet. Nyt yhdentoista vuoden jälkeen kaliumia lukuun ottamatta ravinteiden määrät ja maan happamuus ovat laskussa. Huomattavin lasku on ollut aluksi voimakkaimmin nousseissa kalsiumin ja boorin pitoisuuksissa.



Kuvio 191. Lietetuhkalla+typellä lannoitetun kivennäismaan kuusikon ravinteet (humuskerros).

Syvemmillä maan kivennäiskerroksissa toistui sama ilmiö kuin kivennäismaan männikössä. Lietetuhkalla+typellä lannoitettujen koealojen kalsiumpitoisuudet ovat voimakkaassa nousussa. Muiden ravinteiden pitoisuuksien nousu on ollut maltillista. Oletetaan, että kivennäismaalla kalsiumin vähentäessä happamuutta käyttökelpoisen typen määrä lisääntyy mineralisaation kautta (Helmisaari ym. 2008, 18).

Yllättäen kivennäismaan kuusikon maaperässä myös kaliumin määrä oli yhä selkeässä nousussa.



Kuvio 202. Lietetuhkalla+typellä lannoitetun kivennäismaan kuusikon ravinteet (0–10 cm ja 10–30 cm syvyyksillä).

6 TULOSTEN TARKASTELU

Tässä tutkimuksessa seurattiin erilaisten lannoitteiden vaikutusta puuston kasvuun sekä osin ravinteisiin maaperässä ja neulasissa. Tutkimusaiheen ollessa melko vähän tutkittu, oli mielenkiintoista seurata erilaisten lannoitteiden vaikutuksia nyt, kun tutkimuksen alusta on kulunut aikaa jo 11 vuotta. Aiemmin lietetuhkalannoituksen vaikutusta puuston kehitykseen ei ole tutkittu tässä laajuudessa. Tutkimus antoi uutta hyödyllistä tietoa lietetuhkalannoitteiden pitkäaikaisvaikutuksista.

6.1 Lannoituksen vaikutus happamuuteen ja ravinteisiin

Turvekankaan männikössä seurattiin lannoituksen vaikutusta neulasten ravinteisiin. Niin sanottu ohentumisilmiö tuli esiin niin typen, kalsiumin kuin magnesiuminkin kohdalla. Näiden laskeneet ravinnepitoisuudet olivat taas nousussa. Fosforin määrä ei noussut neulasissa odotetusti lietetuhkalla lannoitetuilla koealoilla. Boorin määrä oli väkilannoitteella käsitellyissä koealoissa palautunut lähes alkuperäiseen tasoonsa. Lietetuhkalla käsitellyillä koealoilla sen sijaan booriarvot olivat yhä selvästi koholla. Parhaimman kasvun aikaansaaneilla lietetuhka-lannoitteilla on saat-
tanut olla se vaikutus, että niiden käytössä ohentumisilmiö tuli esiin PK-lannoitteen käyttöä voimakkaampana.

Turvemailla maaperän happamuus oli muuttunut odotettua vähemmän lietetuhkalla+typellä käsitellyillä koealoilla. Happamuus oli lähes samalla tasolla kun tutkimuksen alussa. Puuston ravinteiden saannin kannalta on hyvä, että happamuuden taso pysyy melko vakaana. Turvemaan pintaosassa voimakkaasti nousseet kalsiumin ja boorin pitoisuudet laskivat nyt lähelle alkuperäisiä arvojaan. Puut ovat ottaneet ravinteita käyttöönsä. Myös syvemmällä turpeessa boorin määrä oli selvässä laskusuunnassa. Alumiinin ja raudan määrä turpeessa oli erittäin suuri. Sekä yllättävän pieneen happamuuden muutokseen että suuriin alumiinin ja raudan määriin saattaa olla syynä se, että lannoitteena on käytetty osittain turpeen poltosta saatua tuhkaa.

Kivennäismaan männikössä humuksen pH-arvo oli yhä noin yhden yksikön suurempi kuin tutkimuksen alussa. Humuksen korkeiksi kohonneet kalsium- ja booripi-

toisuudet olivat nyt laskussa. Kivennäismaan yläkerroksessa kalsiumin määrä moninkertaistui edellisen tutkimuksen tilanteesta. Myös magnesiumin määrä on nyt yli kaksinkertainen verrattuna alkutilanteeseen. Kuusikon ravinteiden kohdalla tilanne oli lähes identtinen verrattaessa sitä kivennäismaan männikön happamuus- ja ravinnetilanteeseen.

6.2 Lannoituksen vaikutus puuston kasvuun

Tutkimuksen suurin odotusarvo kohdistui lietetuhkalannoitteiden pitkäaikaisten kasvuvaiikutusten todentamiseen. Lietetuhkalannoitteet täyttivätkin melko hyvin niille asetetut odotukset.

Lietetuhkalannoitteiden käytöstä on ollut selvää hyötyä turvemaan männikössä. Sen maaperässä on riittävästi typpeä ja tuhkassa olevat ravinteet antoivat väkilannoitetta huomattavasti monipuolisemman ravinnelisäyksen männyille. Väkilannoitteena käytetyn PK-lannoitteen tuottama kasvureaktio turvemailla jäikin melko vai- suksi.

Kivennäismaan männikössä väkilannoitteen antama lisäkasvu oli selkeästi parasta ensimmäisen viiden vuoden aikana. Tutkimuksen jatkuessa lietetuhkalannoitteet petrasivat selkeästi ja saattavat tulevaisuudessa jopa ohittaa kilpailijansa. Pelkkä lietetuhka ei kuitenkaan toistaiseksi auttanut puustoa merkittävään lisäkasvuun.

Tutkimuksen yllättävimmäksi anniksi voi nimetä lisätypellä terästetyn lietetuhka- lannoitteen menestyksen kivennäismaan kuusikossa. Vaikka ensimmäisen viiden vuoden aikana sen tulokset puuston kasvuun jäivät hiukan väkilannoitteen var- joon, jälkimmäisen kuuden vuoden aikana lietetuhkalannoitteen pitkäaikaiset vai- kutukset tulivat selvinä esille. Koko tutkimusjakson aikana se antoi parhaan vuo- tuisen lisäkasvun kuusille. Lietetuhkan+typen antama kasvuvaste on selkeä osoitus sen käyttömahdollisuuksista myös kivennäismailla, kunhan ne ovat riittä- vän viljavia.

Tutkimuksen tuloksena nimenomaan kivennäismaita koskien voidaan todeta, että monipuoliset ravinteet lietetuhkalannoitteissa voivat sielläkin antaa pidemmällä ajanjaksolla väkilannoitetta paremman lisäkasvun. Koska hivenravinteet liikkuvat

puiden sisäisessä ravinnekierrossa huonosti, saattaa niistä tulla puutetta voimakkaan typpilannoituksen jälkeen. Puut eivät saa hivenravinteita liikkumaan niin riva-
kasti kuin kasvanut typpimäärä vaatisi (Helmisaari 1990, 175). Nähtävästi tämän vuoksi väkilannoitteen antama kasvureaktio loppuukin nopeasti. Puiden yhteyttämiseen ja kasvuun liittyvät systeemit ovat niin monitahoisia, että niiden reaktioiden parantaminenkaan ei ole yksinkertaista. Lietetuhkalannoitteen voi sanoa antavan monipuolisesti eri ravinteita sisältävänä lannoitteena hyvät kasvun eväät eri puille kasvupaikalla kuin kasvupaikalla. Jos metsän lannoituksessa käytetään melko yksipuolista pääravinteita sisältävää lannoitetta, seurauksena on helposti puute jostain muusta ravinteesta.

Lannoitteiden kehittäminen on pitkäjänteistä työtä. Tutkiminen vaatii seuranta-erilaisilta kasvupaikoilta ja puulajeilta. Varsinkin seuraavan seurantatutkimuksen jälkeen on jo paljon helpompaa muuttaa kehiteltävien lannoitteiden reseptejä, jos tuloksia halutaan yhä parantaa.

6.3 Lopuksi

Kiitän opinnäytetyön ohjaajaani tohtori Risto Lauhasta neuvoista opinnäytetyön tekemisessä. Myös tohtori Tapani Tasanen ja muut avustaneet opettajat ovat kiitoksensa ansainneet. Opiskelutoverini Anna-Kristiina Koivula ja vaimoni Johanna ovat olleet suureksi avuksi opinnäytetyön eri vaiheissa.

Tehty tutkimus antaa mahdollisuuden tarkempaankin puuston kasvun seurantaan tulevaisuudessa. Kivennäismaan männikössä suoritettu harvennus toi käytettäviksi mäntyjen kantoja kaikilta koealoilta. Niistä olisi mahdollista tutkia eri lannoitteiden vaikutuksia niin kevät- kuin kesälustoissa. Harvennetussa kivennäismaan männikössä olisi myös mahdollisuus tutkia puiden runkomuodon muuttumista niin lannoitetuilla kuin lannoittamattomillakin koealoilla. Tällöin kävisi ilmi, miten suuri kummankin toimenpiteen vaikutus on puun tyviosan järeytymisessä.

Yksi uuden tutkimuksen aihe voisi olla toteutetun toiminnan taloudellinen tarkastelu. Siinä voisi tutkia lannoitekulujen ja levittämiskustannusten suuruutta verrattuna saatuun arvokasvuun. Onko toiminta ollut taloudellisesti mielekäästä ja jos ei, millä

asia saataisiin kuntoon? Tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia voisi käyttää uuden työn pohjatietoina.

Tutkimuksessa saatuja tuloksia on hankala verrata muiden tutkimusten tuloksiin, koska vastaavia pitkäaikaisia lietetuhkalannoituskokeita ei ole Suomessa juuri tehty. Tulevaisuudessa tehtävien tutkimusten vertailupohjaksi tämä opinnäytetyö on sopiva. Lietetuhkalannoituksen käyttöä käsitteleviä tutkimushankkeita ei ole enää 2010-luvulla ollut yksittäisiä poikkeuksia lukuun ottamatta. Alkuinnostuksen jälkeen tutkimushankkeita on haudattu. Tämän tutkimuksen päätelmänä voidaan kuitenkin todeta lietetuhkalannoituksen olevan hyvin käyttökelpoinen tapa metsien lannoittamiseen. Lietetuhkalannoituksen avulla voidaan aktivoida maaperän eliöstön toimintaa ja hyödyntää sitä puiden parantuneena kasvuna.

Tuhkat ja biolietteet ovat jätteitä, jotka on mahdollista ottaa hyödylliseen käyttöön. Olisikin toivottavaa, että Evira ja MMM mahdollistaisivat osaltaan niiden käytön lisäämistä metsien lannoitteena. Pienemmilläkin yrityksillä tulisi olla paremmat mahdollisuudet saada uusia metsänlannoitetuotteita markkinoille. Uudet innovaatiot voivat luoda onnistuessaan paranevan metsän kasvun ohessa paljon uusia työpaikkoja. Tätä ei sovi vähätellä Suomen nykyisessä tilanteessa. Tämän tutkimuksen tapauksessa kysymys on samalla ympäristöystävällisyyden lisääntymisestä ja luonnonvarojen säästämisestä.

LÄHTEET

Eloranta, E. 2008. Liete-tuhkalannoituksen vaikutus puuston kasvuun ja ravinneta-
louteen. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Metsäalan yksikkö. Opinnäytetyö.

Fritze, H. & Perkiömäki, J. Puuntuhkan vaikutus humuskerroksen mikrobistoon
kangasmaalla. Metsätehon raportti 82. 1999. [Verkkojulkaisu]. Metsäteho Oy. [Viitattu 11.8.2014]. Saatavana:

http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_082.pdf

Hakkila, P. & Kalaja, H. 1983. Puu- ja kuorituhkan palauttamisen tekniikka. Helsin-
ki: Metsäntutkimuslaitos. Folia Forestalia 552.

Hallituksen esitys Eduskunnalle jäteverolaiksi. 2010. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu
22.8.2014]. Saatavana:

[https://www.vm.fi/vm/fi/04_julkaisut_ja_asiakirjat/03_muut_asiakirjat/20100702Lau-
sun30394/Luonnos_hallituksen_esitykseksi_Eduskunnalle_jaateverolaiksi.pdf](https://www.vm.fi/vm/fi/04_julkaisut_ja_asiakirjat/03_muut_asiakirjat/20100702Lau-
sun30394/Luonnos_hallituksen_esitykseksi_Eduskunnalle_jaateverolaiksi.pdf)

Heikkilä, T. 2005. Tilastollinen tutkimus. 5.–6. p. Helsinki: Edita Prima Oy.

Heinonen, J. 1994. Koealojen puu- ja puustotunnusten laskentaohjelma KPL käyt-
töohje. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 504.

Helmisaari, H-S., Finér, L., Kukkola, M., Lindroos, A-J. Luiro, J., Piirainen, S.,
Saarsalmi, A., Smolander, A. & Tamminen, P. 2008. 3. Energiapuun korjuu ja
metsän ravinnetase. Teoksessa: Kuusinen, M., Ilvesniemi, H. (toim.). Energiapuun
korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Helsinki: Tapion ja Metlan julkaisu-
ja. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.8.2014]. 18–29. Saatavana:

<http://www.metla.fi/julkaisut/muut/2008-02-08-energiapuun-korjuu-raportti.pdf>

Helmisaari, H-S. 1990. Johdatus metsien perustuotantobiologiaan. Ravinteet ja
perustuotanto. Toim. Lahti, T. & Smolander, H. Silva Carelica 16. Joensuu: Joen-
suun yliopisto.

Huikari, O. & Silfverberg, K. 1985. Tuhkalannoitus metsäojitetuilla turvemaidella.
Helsinki: Metsäntutkimuslaitos. Folia Forestalia 633, 1–25.

Huotari, N. 2012. Tuhkan käyttö metsälannoitteena. [Verkkojulkaisu]. Oulu: Met-
säntutkimuslaitos. [Viitattu 12.4.2014]. Saatavana:

[http://www.metla.fi/julkaisut/isbn/978-951-40-2371-2/tuhkan-kaytto-
metsalannoitteena.pdf](http://www.metla.fi/julkaisut/isbn/978-951-40-2371-2/tuhkan-kaytto-
metsalannoitteena.pdf)

Hynynen, J., Valkonen, S. & Rantala, S. 2005. Tuottava metsänkasvatus. Helsinki:
Metsäkustannus Oy.

Hyvän metsänhoidon suositukset turvemaidelle, 2007. Helsinki: Metsäkustannus Oy.

Hyvän metsänhoidon suositukset. 2014. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Metsäkustannus Oy. [Viitattu 26.9.2014]. Saatavana: http://www.tapio.fi/files/tapio/metsanhoitosuosituksset/Metsanhoidon_suosituksset_ver2_netti.pdf

Hänninen, H. 1998. Puuvarojen käyttömahdollisuudet. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Metsälehti.

Isomaa, J. 2010. Rae- ja irtotuhka suometsien lannoituksessa. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Metsäalan yksikkö. Opinnäytetyö.

Jacobson, S. 2003. Addition of Stabilized Wood Ashes to Swedish Coniferous Stands on Mineral Soils – Effects on Stem Growth and Needle Nutrient Concentrations. *Silva Fennica* 37(4): 437–450. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Metla. [Viitattu 13.8.2014]. Saatavana: <http://www.silvafennica.fi/pdf/article483.pdf>

Jukka, L. (toim.) 1988. Metsänterveysopas - metsätuhot ja niiden torjunta. Helsinki: Samerka Oy.

Jäteverolaki (1126/2010).

Kansallinen metsäohjelma 2015. 2010. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Maa- ja metsätalousministeriö [Viitattu 8.4.2014]. Saatavana: http://www.mmm.fi/attachments/metsat/kmo/5ywLDJ2Uy/Kansallinen_metsaohjelma_2015_Valtioneuvoston_periaatepaatos_16.12.2010.pdf

Korpilahti, A. 2003. Tuhkan esikäsittely metsäkäyttöä varten. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Metsäteho Oy. Metsätehon raportti 143. Konsortiohanke. [Viitattu 18.8.2014]. Saatavana: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_143.pdf

Kukkola, M. & Saarsalmi, A. 2009. Tuhkalannoituksen vaikutus maaperään ja puuston kasvuun. [Verkkojulkaisu]. Metsätieteen aikakauskirja 1/2009, 63–68. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos. [Viitattu 12.4.2014]. Saatavana: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff09/ff091063.pdf>

Kukkola, M. yms. 2003. Energiapuun korjuu harvennusmetsästä. Vaikutukset metsämaan ravinteisiin ja puuntuotantoon. Teoksessa: A. Kariniemi (toim.) Kehittyvä puuhuolto 2003 -seminaari metsäammattilaisille. Seminaarijulkaisu. Helsinki: Metsäteho Oy. 87–93.

Kuuluvainen, J. & Valsta, L. 2009. Metsäekonomian perusteet. Helsinki: Oy Yliopistokustannus.

Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Helsinki: Metsäkustannus Oy.

Laiho, R., Sarkkola, S., Kaunisto, S., Laine, J. & Minkkinen, K. 2008. Seloste artikkelista: Turpeen ravinnepitoisuudet ojitetuissa suometsissä, Macroscale variation in peat element concentrations in drained boreal peatland forests (Silva Fennica 42(4): 555–570). [Verkkojulkaisu]. Metsätieteen aikakauskirja 4/2008, 315–316. Metla. [Viitattu 1.9.2014]. Saatavana:

<http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff08/ff084315.pdf>

Lannoitevalmistelaki (539/2006) ja asetus (MMM 12/07).

Lannoitevalmistesektorin tulevaisuuskatsaus vuosille 2009–2013. 2008. [Verkkojulkaisu]. MMM. [Viitattu 12.4.2014]. Saatavana:

http://www.mmm.fi/attachments/mmm/julkaisut/tyoryhmamuistiot/2009/5DZni0S8G/trm1_2009.pdf

Lauhanen, R., Moilanen, M., Silfverberg, K., Takamaa, H. & Issakainen, J. 1997. Puutuhkalannoituksen kannattavuus eräissä ojitusalueenniköissä. Suo 48(3): 71–82.

Lindth, T., Isännäinen, S., Mursunen, H., Rantala, P.-R., Ollila, S. & Kaunisto, S. 2001. Metsäteollisuuden tuottaman tuhkan ja biolietteen käsittely metsänlannoitteeksi. [Verkkojulkaisu]. VTT Energian raportteja 10/2001. [Viitattu 13.4.2014].

Saatavana: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2001/enerap_10_2001.pdf

Lipponen, S. 1991. Tuhkalannoituksen vaikutus metsämaan happamuuteen ja ravinteisuuteen. Metsämaantieteen syventävien opintojen laudaturtyö. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta.

Makkonen, T. & Häggman, B. 2008. Metsänlannoitus. Helsinki: Metsäkustannus Oy.

Mantsinen, R. 2012. Toimitusjohtaja. Humuspehtoori Oy. Neuvottelu 17.9.2012.

Matilainen, M., Pisto, S., Rinnepelto, P. & Kinnunen, N. 2013. Metsäteollisuuden ravinteet - Metsäteollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen lannoitevalmisteina.

[Verkkojulkaisu]. Joensuu: Apila Group Oy Ab. [Viitattu 14.7.2014]. Saatavana:

<http://www.apilagroup.fi/data/Mets%E4teollisuuden%20ravinteet%20Selvitys.pdf>

Metsikkökokeiden maastotyöohjeet. 1987. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 257. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos.

Metsän kasvuohjelma. Kemira GrowHow. Kemira Agro Oy.

Metsätilastollinen vuosikirja. 2013. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Metla. [Viitattu 22.8.2014]. Saatavana:

http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2013/vsk13_03.pdf

Moilanen, M. 2005. 4.3. Suometsien lannoitus. Julkaisussa: Ahti, E., Kaunisto, S., Moilanen, M. & Murtovaara, I. (toim.) 2005. Suosta metsäksi. Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Helsinki: Metla, 134–166.

Moilanen, M. & Hytönen, J. 2014. Männyn ravinnetilan pitkäaikainen vaihtelu ojite-
tuilla rämeillä – koesarjan esittely ja alustavia tuloksia. [Verkkojulkaisu]. Metlan
työraportteja 301. Helsinki: Metla. [Viitattu 12.8.2014]. Saatavana:
<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp301.pdf>

Moilanen, M. & Issakainen, J. 2003. Puu- ja turvetuhkien vaikutus maaperään,
metsäkasvillisuuden alkuainepitoisuuksiin ja puuston kasvuun. [Verkkojulkaisu].
Metsätehon raportti 162. Helsinki: Metsäteho Oy. [Viitattu 12.8.2014]. Saatavana:
http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_162.pdf

Moilanen, M., Kaunisto, S. & Sarjala, T. 2005. 2.4. Puuston ravinnetilan arviointi.
Julkaisussa: Ahti, E., Kaunisto, S., Moilanen, M. & Murtovaara, I. (toim.). Suosta
metsäksi. Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusoh-
jelman loppuraportti. Helsinki: Metla, 81–95.

Niemelä, A. 2002. Lieite-tuhkalannoitus: Tutkimussuunnitelma Tuomarniemen
metsäoppilaitoksen havaintometsään vuonna 2001 perustetusta kokeesta. Seinä-
joen ammattikorkeakoulu. Maa- ja metsätalouden yksikkö. Opinnäytetyö.

Paarlahti, K., Reinikainen, A. & Veijalainen, H. 1971. Nutritional diagnosis of pine
stands by needle and peat analysis. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*
74,5, 1–58.

Penttilä T., Hökkä, H., Kojola, S., Ahti, E., Sarkkola, S., Päivänen, J. & Laiho, R.
2005. 4.2. Harvennushakkuut ojitusalueilla. Julkaisussa: Ahti, E., Kaunisto, S.,
Moilanen, M. & Murtovaara, I. (toim.). Suosta metsäksi. Suometsien ekologisesti ja
taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Helsinki: Metla,
121–133.

Pietiläinen, P., Sarjala, T., Hartman, M., Karsisto, M. & Kaunisto, S. 2005. 2.3.
Suometsien typpitalous. Julkaisussa: Ahti, E., Kaunisto, S., Moilanen, M. & Murto-
vaara, I. (toim.). Suosta metsäksi. Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestä-
vä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Helsinki: Metla, 61–80.

Projektit tutkimusteemoittain. 2014. [Verkkosivu]. Helsinki: Metla ja VTT. [Viitattu
14.10.2014]. Saatavana:
<http://www.forestenergy2020.org/fi/projektit/?PHPSESSID=c7c26f13123e12c6bf035b42e79f18e5>

Puukila, T. 2013. Tuhkasta vaihtoehto ojitukselle. *Metsälehti Makasiini* 1. 44.

Päivinen, L. 1999. Metsänlannoituksen tuloksia kivennäis- ja turvemailla. Helsinki: Kemira Agro Oy.

Päivänen, J. 2007. Suot ja suometsät – järkevän käytön perusteet. Helsinki: Metsäkustannus Oy.

Rinne, S. 2007. Biopolttoaineiden tuhkaa metsänlannoitteeksi. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: VTT. [Viitattu 13.4.2014]. Saatavana: http://www.motiva.fi/files/3052/Biopolttoaineiden_tuhkaa_lannoitteeksi.pdf

Saarinen, M. 2005. 4.5. Metsänuudistaminen turvemailla. Julkaisussa: Ahti, E., Kaunisto, S., Moilanen, M. & Murtovaara, I. (toim.). Suosta metsäksi. Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Helsinki: Metla, 177–193.

Saarsalmi, A. & Kukkola, M. 2009. Tuhkalannoituksen vaikutus maaperään ja puuston kasvuun. [Verkkojulkaisu]. Metsätieteen aikakauskirja 1/2009: 63–68. Helsinki: Metla. [Viitattu 18.8.2014]. Saatavana: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff09/ff091063.pdf>

Saarsalmi, A., Kukkola, M., Moilanen, M. & Arola, M. 2006. Long-term effects of ash and N fertilization on stand growth, tree nutrient status and soil chemistry in a Scots pine stand. *Forest Ecology and Management* 235 (2006): 116–128.

Saarsalmi, A., Smolander, A., Kukkola, M. & Arola, M. 2010. Effect of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes, and stand growth in two coniferous stands in Finland. *Plant and soil*. 331 (1-2), 329–340.

Saarsalmi, A., Smolander, A., Kukkola, M., Moilanen, M. & Saramäki, J. 30-Year effects of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes and stand growth in a Scots pine stand. *Forest Ecology and Management*. 278, 63–70.

Saarsalmi, A., Smolander, A., Moilanen, M. & Kukkola, M. 2014. Wood ash in boreal, low-productive pine stands on upland and peatland sites: Long-term effects on stand growth and soil properties. *Forest Ecology and Management* 327, 86–95.

Salonen, K. 1999. Metsän lannoitus. Teoksessa Kaija Kanninen (toim). *Metsäteknologia muuttuvassa metsätaloudessa*. Helsinki: Metla.

Sarkkinen, J. 2012. Savon Sellu Oy:n lietteen käsittelyn kehittäminen. [Verkkojulkaisu]. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 14.10.2014]. Saatavana: http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/38866/Sarkkinen_Jouko_2012_01_26.pdf?sequence=1

Siitonen, J. 2008. 4. Energiapuun korjuun vaikutukset metsälajiston monimuotoisuuteen. [Verkkodokumentti]. 30–35. Julkaisussa: Kuusinen, M., Ilvesniemi, H. (toim.). Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Helsinki: Tapon ja Metlan julkaisuja. [Viitattu 12.8.2014]. Saatavana:

<http://www.metla.fi/julkaisut/muut/2008-02-08-energiapuun-korjuu-raportti.pdf>

Silfverberg, K. & Mertaniemi, A-L. 1997. Ravinteiden huuhtoutuminen tuhkalanhoituksesta turpeesta. Julkaisussa: Nurmi, J., Hytönen, J. & Polet, K. Energiapuusta puutuhkaksi. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 660. Helsinki: Metla, 27–34.

Soininen, H., Mäkelä, L., Kyyhkynen, A. & Muukkonen, E. 2010. Biopolttoaineita käyttävien energiantuotantolaitosten tuhkien hyötykäyttö- ja logistiikkavirrat Itä-Suomessa. [Verkkojulkaisu]. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu, Tutkimuksia ja raportteja 59. [Viitattu 18.8.2014]. Saatavana:

https://www.mamk.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/mamk/embeds/mamkwwwstructure/14235_1473-URNISBN9789515883049.pdf

Österbacka, J. 2001. Esikäsittelyn vaikutuksesta puu- ja turvetuhkien ominaisuuksiin ja ravinteiden liukenemiseen. [Verkkojulkaisu]. Metsätehon raportti 109. Helsinki: Metsäteho Oy. [Viitattu 14.7.2014]. Saatavana:

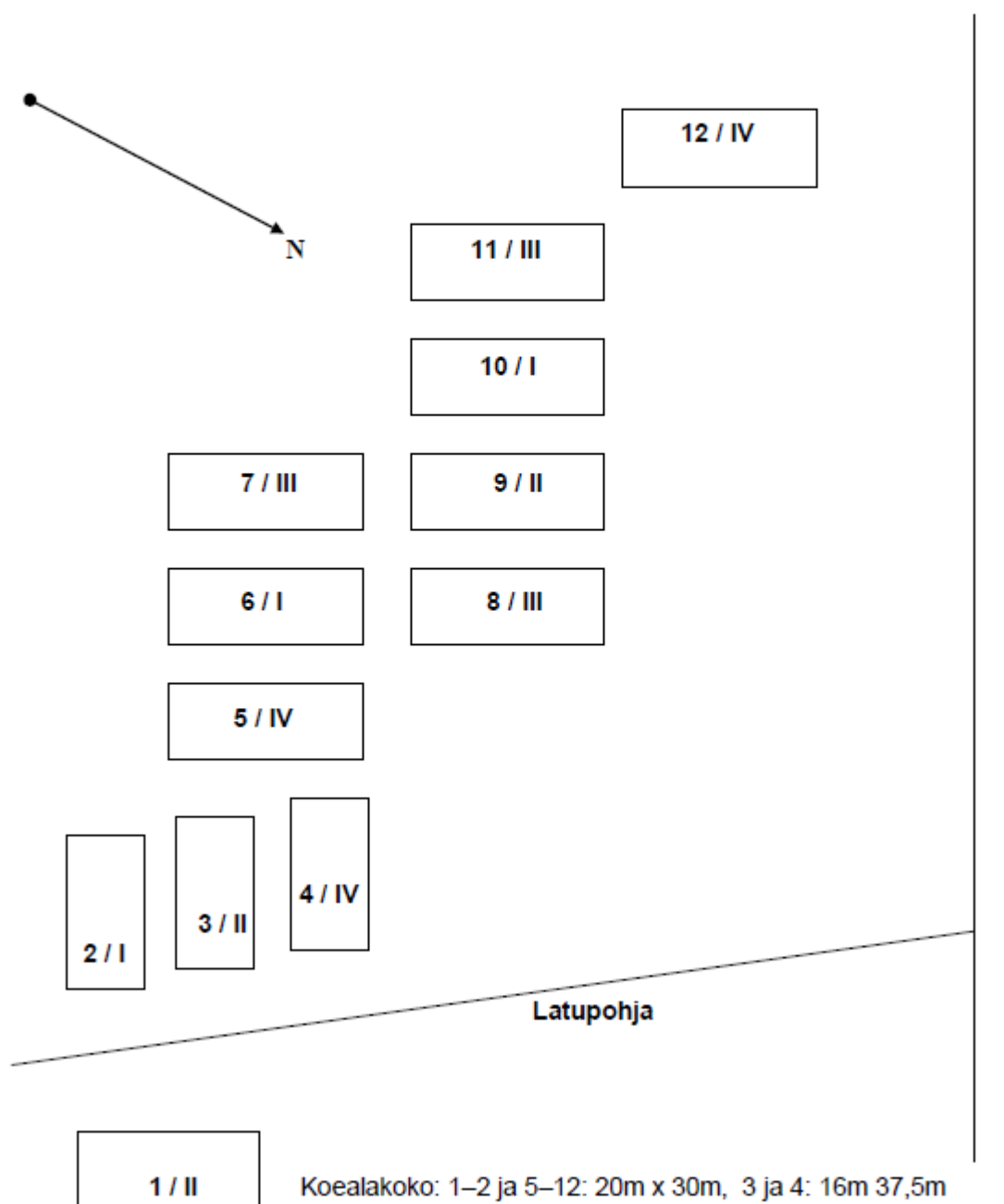
http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_109.pdf

LIITE 1. Koealakat (Eloranta 2008, 53)

1(3)

- a) Koe 1. Turvemaan männikkö
 Koealan numero / Käsittely
 I = käsittelemätön, II = väkilannoitettu
 III = lietetuhkalannoitus, IV = liete-tuhka+typpilannoitus

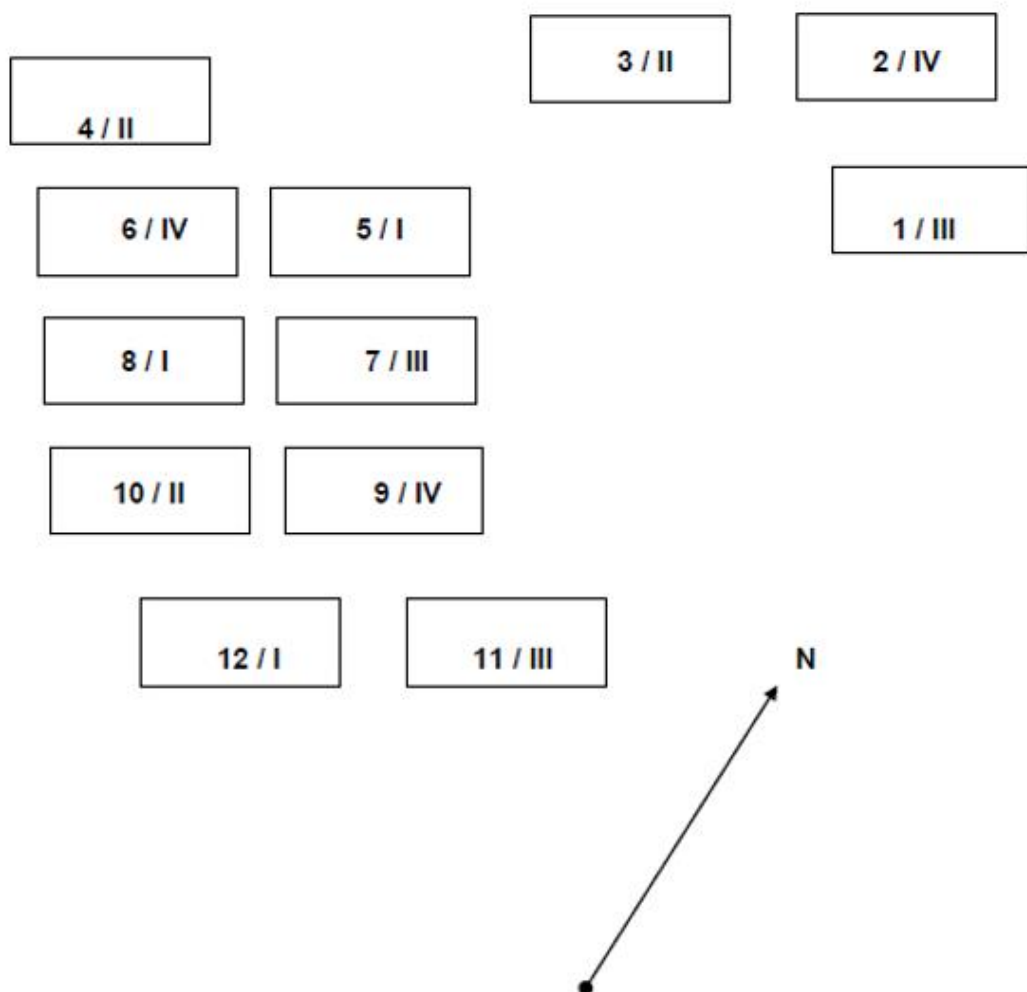
Ähtäriin



(Eloranta 2008, 54)

2(3)

b) Koe 2. Kivennäismaan männikkö
(Selitykset kuten kokeen 1 kartassa)



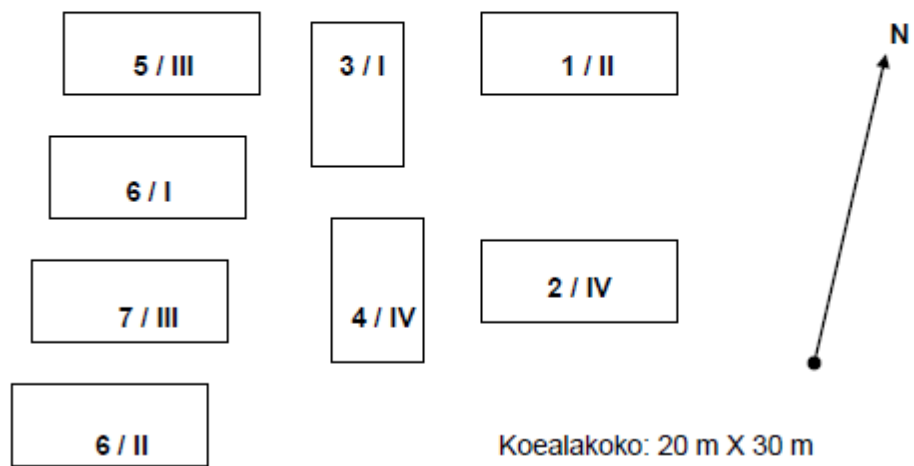
Koealakoko: 20 m X 45 m

(Eloranta 2008, 55)

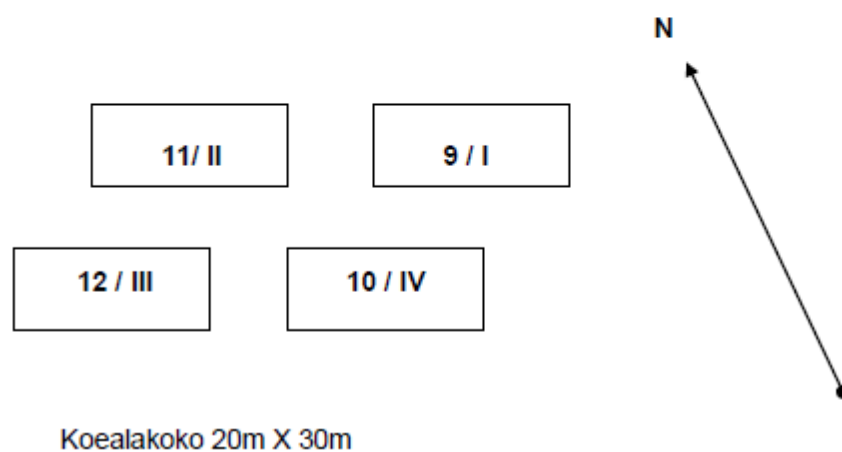
3(3)

Koe 3. Kivennäismaan kuusikko
(Selitykset kuten liitteen sivulla 1)

Koekenttä A:



Koekenttä B:



LIITE 2. Neulasanalyysin tulokset, turvemaan männikkö

Neulasanalyysi, turvemaan männikkö

Ravinteiden keskiarvot eri lannoitealoilta

	O-ruutu			Väkilannoitettu			Liete-tuhka			Liete-tuhka+N		
	2001	2006	2012	2001	2006	2012	2001	2006	2012	2001	2006	2012
N, g/kg	14,9	12,9	14,5	15,1	13,2	14,4	15,2	13,2	13,7	15,1	13,6	15,1
P, g/kg	1,7	1,5	1,9	1,9	1,7	1,8	1,7	1,8	1,6	1,8	1,8	1,8
K, g/kg	4,2	4,1	4,3	4	5	4,8	4,6	5,3	5,1	4,2	5,3	5,5
Ca, g/kg	2,5	2	2,6	2,4	2,2	2,9	2,6	2,3	2,9	2,9	1,9	2,8
Mg, g/kg	1,6	1,3	1,5	1,7	1,3	1,1	1,7	1,2	1,1	1,9	1,2	1,2
B, mg/kg	14,7	14,7	13	14,3	28	17	17	26	22	15	22	24
Cu, mg/kg	3,3	< 5,6	< 5	3,5	< 5,6	< 5	4,8	< 5,6	< 5	5,2	< 5,6	< 5
Mn, mg/kg	343	317	310	406,7	290	410	353	183	280	403,3	140	270
Zn, mg/kg	68,7	51	57	51,7	58,7	48	59,3	58	55	61,7	54,7	56

LIITE 3. Ravinneanalyysit lietetuhkakoealoilta, turvemaan männikkö 1(3)

Koeala/syvyys	4 / 0 - 10 cm			5 / 0 - 10 cm			12 / 0 - 10 cm		
	2001	2007	2013	2001	2007	2013	2001	2007	2013
Happamuus	3,6	3,9	3,6	3,2	4,3	3,5	3,6	3,8	3,7
Typpi, %	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,5	1,5
Fosfori, g/kg	0,7	0,7	0,7	0,7	1	0,7	0,7	0,6	0,6
Kalium, g/kg	0,4	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,4	0,4	0,3
Kalsium, g/kg	3	5,7	3,2	2,8	9,3	2,4	2,5	3,4	2,7
Magnesium, g/kg	0,3	0,8	0,4	0,3	1,1	0,5	0,4	0,7	0,5
Boori, mg/kg	2	3,9	1	1,7	8,3	0,7	2,1	1,3	0,7
Rauta, mg/kg	1,1	34,3	1680	0,2	40,2	2550	0,1	24,9	1430
Alumiini, mg/kg	0,8	22,8	1060	0,9	23,3	1060	1	18	1170

Koeala/syvyys	4 / 10 - 20 cm			5 / 10 - 20 cm			12 / 10 - 20 cm		
	2001	2007	2013	2001	2007	2013	2001	2007	2013
Happamuus	3,6	3,3	3,5	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,7
Typpi, %	1,8	1,9	1,8	1,8	1,6	1,6	1,9	1,8	1,8
Fosfori, g/kg	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,9	0,8	0,8
Kalium, g/kg	0,1	0,5	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3
Kalsium, g/kg	1,6	1,5	1,8	1,4	1,4	1,3	1,5	1,9	1,8
Magnesium, g/kg	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3
Boori, mg/kg	1,3	0,6	0,5	1,3	0,6	0,2	1,6	0,7	0,6
Rauta, mg/kg	0,8	18,5	1120	0,9	22,5	615	0,8	21,1	1090
Alumiini, mg/kg	0,2	34,2	1720	0,2	27,3	1840	1,9	29,5	2330

Ravinneanalyysit lietetuhkakoealoilta, kivennäismaan männikkö

2(3)

Koeala/syvyys	2 / humus			6 / humus			9 / humus		
	2001	2007	2013	2001	2007	2013	2001	2007	2013
Happamuus			5,3			4,9			5,2
Typpi	1,4	1,5	1,41	1,3	1,4	1,48	1,2	1,3	1,3
Fosfori	1	1,6	2,7	0,9	2,3	1,4	1	1,5	1,7
Kalium	1,2	1,3	1,6	0,9	1,3	1,3	1,3	1	1,4
Kalsium	4,3	15,6	20	5	24,2	11,8	4,6	14,7	13,8
Magnesium	0,6	1,2	1,6	0,7	1,9	1,1	0,7	1,2	1
Boori	5,4	18,4	19,5	5,7	26,5	7,5	7,5	18	12

Koeala/syvyys	2 / 0 - 10 cm			6 / 0 - 10 cm			9 / 0 - 10 cm		
	2001	2007	2013	2001	2007	2013	2001	2007	2013
Fosfori, mg/l	1,9	3,9	9,8	1,3	3,5	3,2	3,9	4,4	13
Kalium, mg/l	29,6	42	49	33,8	37	58	33,6	40	85
Kalsium, mg/l	139	280	770	160	140	380	144	180	990
Magnesium, mg/l	23	46	54	20,1	28	41	16,4	34	66

Koeala/syvyys	2 / 10 - 30 cm			6 / 10 - 30 cm			9 / 10 - 30 cm		
	2001	2007	2013	2001	2007	2013	2001	2007	2013
Fosfori, mg/l	2	2	1,5	2	2	< 1,5	2,6	2	2,1
Kalium, mg/l	27,6	54	36	21,5	54	36	22	71	41
Kalsium, mg/l	113	140	220	129	140	170	81,4	280	260
Magnesium, mg/l	18,7	23	41	13,8	23	24	12,4	34	28

Ravinneanalyysit lietetuhkakoealoilta, kivennäismaan kuusikko

3(3)

Koeala/syvyys	2 / humus			4 / humus			10 / humus		
	2001	2007	2013	2001	2007	2013	2001	2007	2013
Happamuus			4,8			5			5,4
Typpi	1,7	1,9	1,59	1,3	1,6	1,41	1,3	1,7	1,46
Fosfori	1,3	3	1,6	0,6	1,6	1,6	1	1,4	2,3
Kalium	0,8	1,2	1	0,7	1,2	1,3	1	1	1,3
Kalsium	4,5	26,4	11,2	4,5	17,1	12,4	3,1	12	17,7
Magnesium	0,6	1,7	1	0,4	1,6	1,1	0,5	1	1,4
Boori	3,6	25,7	7,8	3,5	20,4	11,2	4,2	11,5	17,5

Koeala/syvyys	2 / 0 - 10 cm			4 / 0 - 10 cm			10 / 0 - 10 cm		
	2001	2007	2013	2001	2007	2013	2001	2007	2013
Fosfori, mg/l	< 1	< 3,5	1,9	1,1	< 3,5	14	1,2	< 3,5	16
Kalium, mg/l	20,4	32	85	21,1	26	180	31,6	34	130
Kalsium, mg/l	141	130	480	67	150	1000	120	120	1600
Magnesium, mg/l	30,2	22	74	11,8	25	86	26,2	44	120

Koeala/syvyys	2 / 10 - 30 cm			4 / 10 - 30 cm			10 / 10 - 30 cm		
	2001	2007	2013	2001	2007	2013	2001	2007	2013
Fosfori, mg/l	< 1	< 3,5	4,4	1,2	< 3,5	< 1,5	2	< 3,5	2,9
Kalium, mg/l	13,8	26	48	17,5	23	38	35,6	25	59
Kalsium, mg/l	170	210	500	98,2	110	140	169	140	400
Magnesium, mg/l	23,5	28	60	14,8	20	23	26,9	24	57

LIITE 4. Kivennäismaan männikön puustotiedot ennen ja jälkeen harvennuksen

	KPL/HA	PPA/HA	PPAU/HA	DM	DUM	DW	DUW	HM	HW	HWU	V
1	544,4	28,18	23,95	25,5	23,5	26,3	24,2	23,26	23,43	23,44	314,68
2	511,1	25,48	21,63	25	23	25,8	23,8	23,91	24,15	24,16	295,25
3	655,6	29,07	24,36	23,6	21,6	24,2	22,1	22,59	22,73	22,74	313,44
4	766,7	28,06	23,83	21,3	19,6	22,5	20,7	20,91	21,27	21,26	279,43
5	644,4	23,79	20,04	21,4	19,7	22,4	20,5	18,41	18,73	18,72	215,98
6	711,1	26,657	22,76	21,6	20	22,6	20,8	20,87	21,21	21,21	267,72
7	877,8	33,42	28,14	21,8	20	22,6	20,7	21,61	21,82	21,82	341,17
8	777,8	27,44	23,12	21	19,3	21,8	20	20,68	20,92	20,91	268,36
9	633,3	29,65	24,79	24,1	22	25,3	23,1	22,71	22,98	22,99	318,81
10	644,4	29,16	24,67	23,8	21,9	24,7	22,7	22,45	22,78	22,79	310,63
11	622,2	27,06	22,55	23,3	21,3	24,2	22,1	22,03	22,2	22,21	278,28
12	700	30,85	25,76	23,5	21,4	24,4	22,4	22	22,26	22,28	316,41
	674,07	28,23	23,80	22,99	21,11	23,90	21,93	21,79	22,04	22,04	293,35

	KPL/HA	PPA/HA	PPAU/HA	DM	DUM	DW	DUW	HM	HW	HWU	V
1	433,3	23,151	19,703	25,9	23,9	26,6	24,6	23,43	23,51	23,51	259,18
2	400	20,827	17,705	25,5	23,5	26,4	24,4	23,92	24,2	24,21	241,16
3	444,4	21,057	17,532	24,5	22,3	24,9	22,7	22,77	22,86	22,86	226,6
4	533,3	21,25	18,148	22,3	20,6	23,3	21,5	21,28	21,55	21,54	216,97
5	511,1	19,283	16,346	21,7	20	22,7	20,8	18,39	18,73	18,72	176,97
6	500	19,596	16,741	22,1	20,4	23	21,3	21,17	21,44	21,44	199,03
7	533,3	22,633	18,978	23,1	21,2	23,6	21,6	22,02	22,09	22,09	232,38
8	533,3	19,61	16,501	21,4	19,7	22,2	20,3	20,82	21,06	21,06	193,07
9	466,7	22,542	18,829	24,6	22,4	25,5	23,3	22,65	22,86	22,87	242,66
10	455,6	22,3	18,782	24,8	22,7	25,5	23,4	22,67	22,91	22,92	237
11	466,7	21,317	17,797	23,9	21,8	24,8	22,7	21,79	22,05	22,06	214,59
12	522,2	23,741	19,707	23,8	21,7	24,8	22,7	22,26	22,47	22,49	244,55
	483,33	21,44	18,06	23,63	21,68	24,44	22,44	21,93	22,14	22,15	223,68

LIITE 5. Maanäytteiden analyysimenetelmät

Menetelmät ja epätarkkuudet

Määrittäminen	Menetelmäkuvaus	Luotettavuus 95 % varmuudella
Johtoluku 10xS/cm	Jl mitataan maa-vesi -suspensiosta. (1:2,5)	
Pintamaan maalaji a)	MMPIMAAL.DOC. Aistinvarainen määrittäminen.	
Multavuus a)	MMPIMAAL.DOC. Aistinvarainen määrittäminen.	
Happamuus pH	pH mitataan maa-vesi -suspensiosta. (1:2,5); VUORINEN, J. & MÄKITIE O. 1955. The method of soil testing in use in Finland. Agrogeol. Publ. 63:1-44. Methods of soil and plant analysis, 1986 Jokioinen.	
Typpi (N), kokonaispitoisuus %	Kjeldahl-menetelmä tai Dumas-menetelmä	
Rikki (S) mg/l a)	MMVT.DOC. Uutto happamaan ammoniumasetaatti-liuokseen, mittausta ICP:llä. Viljavuusluokkien laskennassa käytetään toteamisrajaa.	9 < 15 %; < 9 50 %
Fosfori (P) mg/l a)	MMVT.DOC. Uutto happamaan ammoniumasetaatti-liuokseen, ammoniummolybdaatti -kompleksin spektrofotometrinen mittausta.	20 %
Kalium (K) mg/l a)	MMVT.DOC. Uutto happamaan ammoniumasetaatti-liuokseen, mittausta ICP:llä.	15 %
Kalsium (Ca) mg/l a)	MMVT.DOC. Uutto happamaan ammoniumasetaatti-liuokseen, mittausta ICP:llä.	15 %
Magnesium (Mg) mg/l a)	MMVT.DOC. Uutto happamaan ammoniumasetaatti-liuokseen, mittausta ICP:llä.	15 %

LIITE 6. Neulasnäytteiden analyysimenetelmät

Menetelmät ja epätarkkuudet

Määrittäminen	Menetelmäkuvaus	Luotettavuus 95 % varmuudella
Typpi (N) g/kg ka a)	YMRRV_RN.DOC. Kjeldahl-menetelmä, ISO 1871:1975 ja ISO 937:1978 tai Dumas-menetelmä, modifioitu EN 13654-2:2002.	10 %
Fosfori (P) g/kg ka a)	YMKIVENN.DOC. Kuivapoltto 550°C, HCl-uutto, mittaus ICP-AES:llä. ISO 5516:1978	10 %
Kalium (K) g/kg ka a)	YMKIVENN.DOC. Kuivapoltto 550°C, HCl-uutto, mittaus ICP-AES:llä. ISO 5516:1978	15 %
Kalsium (Ca) g/kg ka a)	YMKIVENN.DOC. Kuivapoltto 550°C, HCl-uutto, mittaus ICP-AES:llä. ISO 5516:1978	25 %
Magnesium (Mg) g/kg ka a)	YMKIVENN.DOC. Kuivapoltto 550°C, HCl-uutto, mittaus ICP-AES:llä. ISO 5516:1978	15 %
Boori (B) mg/kg ka a)	YMKIVENN.DOC. Kuivapoltto 550°C, HCl-uutto, mittaus ICP-AES:llä. ISO 5516:1978	2-13 mg/kg 40 % > 13 mg/kg 20 %
Kupari (Cu) mg/kg ka a)	YMKIVENN.DOC. Kuivapoltto 550°C, HCl-uutto, mittaus ICP-AES:llä. ISO 5516:1978	35 %
Mangaani (Mn) mg/kg ka a)	YMKIVENN.DOC. Kuivapoltto 550°C, HCl-uutto, mittaus ICP-AES:llä. ISO 5516:1978	25 %
Sinkki (Zn) mg/kg ka a)	YMKIVENN.DOC. Kuivapoltto 550°C, HCl-uutto, mittaus ICP-AES:llä. ISO 5516:1978	30 %

a) -Merkityt määritykset on tehty FINAS:in ISO/IEC 17025 mukaisesti akkreditoimalla menetelmällä. Tulos koskee vain meille tullutta näytettä.

LIITE 7. KPL-laskentatulokset koealoilta, turvemaan männikkö.

1(3)

(Koejäsen: I = lannoittamaton, II = mineraalilannoitus, III = lietetuhkalannoitus, IV = lietetuhka+typpilannoitus)

Turvemaan männikkö						
2001	KPL/HA	PPA(m ²)/ha	DW(cm)	HM(m)	V(m ³)	Koejäsen
1	483,3	10,209	16,6	14,95	78,99	II
2	633,3	10,86	15,7	13,5	75,79	I
3	550	11,82	17,1	15,29	90,19	II
4	616,7	14,45	17,8	15,43	109,78	IV
5	633,3	11,87	16,1	13,68	80,59	IV
6	716,7	13,52	16,1	14,1	94,5	I
7	750	14,25	16,2	14,61	102,02	III
8	666,7	12,18	15,8	13,51	83,83	III
9	716,7	12,36	15,3	13,58	87,07	II
10	716,7	12,71	15,7	14,49	91,78	I
11	683,3	12,7	15,9	14,66	93,68	III
12	850	13,57	14,9	14	91,37	IV
2007	KPL/HA	PPA(m ²)/ha	DW(cm)	HM(m)	V(m ³)	Koejäsen
1	483,3	12,36	18,3	16,7	97,81	II
2	633,3	13,18	17,2	14,83	97,59	I
3	550	14,91	18,7	16,74	113,81	II
4	616,7	17,45	19,6	16,9	142,1	IV
5	633,3	14,7	17,8	15,08	109,36	IV
6	716,7	15,53	17,2	15,26	117,21	I
7	750	16,84	17,5	15,8	130,46	III
8	666,7	14,38	17,1	14,91	106,72	III
9	716,7	14,8	16,8	14,75	113,89	II
10	716,7	14,65	16,8	15,37	112,16	I
11	683,3	15,87	17,8	15,94	123,76	III
12	850	16,29	16,4	15,31	122,04	IV
2012	KPL/HA	PPA(m ²)/ha	DW(cm)	HM(m)	V(m ³)	Koejäsen
1	483,3	15,76	20,6	17,98	124,2	II
2	633,3	16,18	19,1	15,93	121	I
3	550	17,65	20,8	18,31	142,36	II
4	616,7	21,47	21,8	18,11	177,92	IV
5	633,3	18,18	19,8	16,48	137,22	IV
6	716,7	18,85	18,9	16,61	141,4	I
7	750	21,15	19,6	17,32	164,13	III
8	666,7	17,9	19,0	16,39	134,37	III
9	716,7	18	18,5	16,19	136,45	II
10	716,7	18	18,7	16,48	134,85	I
11	683,3	20,52	20,2	17,91	163,8	III
12	850	20,59	18,4	16,83	152,16	IV

KPL-laskentatulokset koealoilta, kivennäismaan männikkö.

2(3)

(Koejäsen: I = lannoittamaton, II = mineraalilannoitus, III = lietetuhkalannoitus, IV = lietetuhka+typpilannoitus)

Kivennäismaan männikkö						
2001	KPL/HA	PPA(m ²)/ha	DW(cm)	HM(m)	V(m ³)	Koejäsen
1	544,40	22,64	23,6	20,74	242,91	III
2	511,10	19,46	22,6	20,85	211,01	IV
3	655,60	23,07	21,5	19,70	235,34	II
4	766,70	21,59	19,8	17,82	198,81	II
5	644,40	18,59	19,8	17,18	166,77	I
6	722,20	20,55	19,7	18,10	193,01	IV
7	877,80	26,67	20,2	18,69	251,87	III
8	777,80	21,73	19,4	18,08	203,08	I
9	633,30	22,33	21,9	19,30	220,07	IV
10	644,40	21,62	21,2	19,27	201,86	II
11	622,20	21,86	21,8	19,31	210,09	III
12	700,00	25,20	22,0	19,39	243,53	I
2007	KPL/HA	PPA(m ²)/ha	DW(cm)	HM(m)	V(m ³)	Koejäsen
1	544,40	24,87	24,7	21,93	272,27	III
2	511,10	22,37	24,2	22,71	254,80	IV
3	655,60	26,05	22,9	21,55	278,13	II
4	766,70	25,16	21,5	19,76	243,98	II
5	644,40	20,67	20,9	18,39	189,99	I
6	722,20	23,63	21,1	19,85	233,44	IV
7	877,80	29,59	21,3	20,21	293,18	III
8	777,80	24,05	20,4	19,34	232,65	I
9	633,30	25,53	23,4	20,99	267,46	IV
10	644,40	25,44	23,0	21,03	263,35	II
11	622,20	23,97	22,8	20,69	240,46	III
12	700,00	27,67	23,1	20,46	275,71	I
2012	KPL/HA	PPA(m ²)/ha	DW(cm)	HM(m)	V(m ³)	Koejäsen
1	544,40	28,18	26,3	23,26	314,68	III
2	511,10	25,48	25,8	23,91	295,25	IV
3	655,60	29,07	24,2	22,59	313,44	II
4	766,70	28,06	22,5	20,91	279,43	II
5	644,40	23,79	22,4	18,41	215,98	I
6	711,10	26,66	22,6	20,87	267,72	IV
7	877,80	33,42	22,6	21,61	341,17	III
8	777,80	27,44	21,8	20,68	268,36	I
9	633,30	29,65	25,3	22,71	318,81	IV
10	644,40	29,16	24,7	22,45	310,63	II
11	622,20	27,06	24,2	22,03	278,28	III
12	700,00	30,85	24,4	22,00	316,41	I

KPL-laskentatulokset koealoilta, kivennäismaan kuusikko.

3(3)

(Koejäsen: I = lannoittamaton, II = mineraalilannoitus, III = lietetuhkalannoitus, IV = lietetuhka+typpilannoitus)

Kivennäismaan kuusikko						
2001	KPL/HA	PPA(m ²)/ha	DW(cm)	HM(m)	V(m ³)	Koejäsen
1	600	20,23	21,1	18,99	198,51	II
2	783,3	24,50	20,5	18,46	226,63	IV
3	566,7	18,04	21,4	18,44	166,96	I
4	933,3	20,81	17,6	15,43	169,75	IV
5	583,3	18,19	20,5	19,03	178,31	III
6	833,3	19,06	17,7	15,84	156,9	I
7	700	17,29	18,8	16,17	146,49	III
8	550	15,12	19,7	16,78	132,98	II
9	733,3	16,59	17,5	16,33	139,17	I
10	716,7	16,80	17,8	16,55	147,35	IV
11	1016,7	23,11	17,5	17,19	206,05	II
12	766,7	20,69	19,0	17,62	184,55	III
2007	KPL/HA	PPA(m ²)/ha	DW(cm)	HM(m)	V(m ³)	Koejäsen
1	600	24,44	23,2	20,43	251,53	II
2	783,3	28,58	22,1	19,93	277,51	IV
3	566,7	20,62	22,9	19,62	204,42	I
4	933,3	25,21	19,5	17,06	221,09	IV
5	583,3	21,82	22,5	20,77	229,92	III
6	833,3	21,88	18,9	17,2	194,91	I
7	700	20,16	20,4	17,52	180,98	III
8	550	18,58	21,8	18,11	170,53	II
9	733,3	19,37	19,0	17,77	176,77	I
10	716,7	21,28	20,0	18,23	198,91	IV
11	1016,7	28,51	19,5	19,1	276,67	II
12	766,7	24,46	20,6	19,33	238,54	III
2012	KPL/HA	PPA(m ²)/ha	DW(cm)	HM(m)	V(m ³)	Koejäsen
1	600	28,78	25,1	21,9	301,21	II
2	783,3	33,98	24,1	21,99	347,38	IV
3	566,7	23,94	24,7	19,61	227,91	I
4	933,3	30,47	21,5	19,14	283,38	IV
5	583,3	25,8	24,5	22,17	279,12	III
6	833,3	25,59	20,5	18,7	238,05	I
7	700	23,89	22,3	17,48	210,82	III
8	550	22,31	24,0	18,11	201,16	II
9	733,3	23,11	20,7	17,76	204,48	I
10	716,7	26,09	22,2	20,27	252,67	IV
11	1016,7	34,5	21,5	20,38	337,06	II
12	766,7	29,41	22,7	21,39	295,55	III

LIITE 8. Puuston kasvu- ja kasvunlisäystunnuksia 2001–2012.

(Käsittelyt: I = lannoittamaton, II = väkilannoitus, III = lietetuhkalannoitus, IV = liete-tuhka+typpilannoitus)

Turvemaan männikkö									
Käsittely	Ppa:lla painotettu keskiläpimitta			Pohjapinta-ala			Tilavuus		
	Kasvu	Kasvunlisäys		Kasvu	Kasvunlisäys		Kasvu	Kasvunlisäys	
	mm/a	mm/a	%	m ² /ha/a	m ² /ha/a	%	m ³ /ha/a	m ³ /ha/a	%
I	2,79			0,48			4,10		
II	3,30	0,52	18,5	0,52	0,03	6,8	4,45	0,35	8,6
III	3,30	0,52	18,5	0,62	0,14	28,2	5,54	1,44	35,2
IV	3,39	0,61	21,7	0,62	0,13	27,7	5,62	1,53	37,3

Kivennäismaan männikkö									
Käsittely	Ppa:lla painotettu keskiläpimitta			Pohjapinta-ala			Tilavuus		
	Kasvu	Kasvunlisäys		Kasvu	Kasvunlisäys		Kasvu	Kasvunlisäys	
	mm/a	mm/a	%	m ² /ha/a	m ² /ha/a	%	m ³ /ha/a	m ³ /ha/a	%
I	2,24			0,50			5,68		
II	2,70	0,45	20,3	0,61	0,11	20,9	8,11	2,43	42,8
III	2,27	0,03	1,4	0,53	0,03	5,6	6,95	1,27	22,4
IV	2,88	0,64	28,4	0,59	0,09	17,5	7,81	2,13	37,5

Kivennäismaan kuusikko									
Käsittely	Ppa:lla painotettu keskiläpimitta			Pohjapinta-ala			Tilavuus		
	Kasvu	Kasvunlisäys		Kasvu	Kasvunlisäys		Kasvu	Kasvunlisäys	
	mm/a	mm/a	%	m ² /ha/a	m ² /ha/a	%	m ³ /ha/a	m ³ /ha/a	%
I	2,82			0,57			6,29		
II	3,73	0,91	32,3	0,82	0,25	43,2	9,15	2,86	45,6
III	3,39	0,58	20,4	0,70	0,12	21,0	8,37	2,08	33,1
IV	3,61	0,79	28,0	0,86	0,29	50,0	10,30	4,01	63,8